

MIGUEL JOSÉ PEREIRA SALES CAVIQUE SANTOS

UMA ABORDAGEM AXIOMÁTICA AO PROJECTO DE SISTEMAS
DE CLIMATIZAÇÃO

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

A presente dissertação foi preparada no âmbito do protocolo de Abril de 2002 assinado entre a FCT da Universidade Nova de Lisboa e a ESTS do Instituto Politécnico de Setúbal.

LISBOA

2010

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.

Ricardo Reis

À minha filha, Rita

Agradecimentos

Quando se faz um Doutoramento perto dos cinquenta anos, as influências, os apoios e os estímulos repartem-se por inúmeras pessoas. Agradeço, pois, a todos os amigos e colegas que me ajudaram e me apoiaram no período da realização desta dissertação. Em particular, desejo agradecer às seguintes pessoas e entidades:

Ao IPS, Instituto Politécnico de Setúbal, pela dispensa, menos bem aproveitada, ao abrigo do PRODEP, nos anos de 1997 e 1998 e pela licença sem vencimento que me foi facultada nos anos de 2008 e 2009, e que relaciono com a anterior.

À minha empresa, CEST, pelo apoio financeiro, no período desta licença.

Ao Professor António Gonçalves Coelho, meu orientador, pela cordialidade, estímulo e orientação científica que me deu, pelo formalismo e rigor científico que com ele aprendi e, sobretudo, pela liberdade que me concedeu e pela entendimento que teve sobre o que seria o meu Doutoramento.

Ao Professor António Mourão, pela indicação inicial da existência da Teoria Axiomática de Projecto e pelo apoio amigo que sempre demonstrou ao longo destes anos de trabalho.

Aos meus colaboradores, em especial nas pessoas dos Engenheiros André Felício e João Grenha, pela compreensão, dedicação e disponibilidade evidenciada, o que me permitiu, por diversos períodos, dedicar inteiramente a este trabalho.

Ao Francisco Orvalho pela execução de várias revisões de figuras e à Dr^a Rita Greña pela revisão dos textos.

Finalmente, mas não menos importante, agradeço à minha mulher, Cristina, e à minha filha, Rita, pelo apoio paciente que me deram.

Sumário

Nesta tese, aplicou-se a Teoria Axiomática de Projecto (AP) aos principais sistemas de climatização (AVAC). Esta teoria, desenvolvida por Nam P. Suh e publicada pela primeira vez em 1990, define dois axiomas que regem a execução de qualquer projecto: “manter a independência entre requisitos funcionais” e “minimizar a informação contida no projecto”.

Aplicando o primeiro axioma da AP, classifica-se um projecto em independente, desacoplável ou acoplado. Um bom projecto será independente ou, caso não seja possível, desacoplável. A qualquer deste tipo de projectos aplica-se o segundo axioma, que assegura que o sistema possa funcionar dentro dos limites estabelecidos, sempre que a sua informação seja nula.

Usando em particular as normas EN 13779, a EN 15251 e a ASHRAE 62.1, foi possível identificar as funções mais elevadas a que um sistema deve obedecer. São elas: “assegurar condições térmicas adequadas”, “assegurar ambientes interiores saudáveis” e “reduzir o consumo de energia do sistema AVAC”. Estas funções permitem construir as matrizes de projecto da AP, neste caso aplicadas aos seguintes sistemas: sistemas de volume de ar variável (VAV) e sistemas com ar novo dedicado. Para estes últimos, considera-se os sistemas com ventiloconvectores (VC), com unidades de indução (UI) e com tectos arrefecidos (TA).

Estas matrizes demonstram que os sistemas VAV e os sistemas típicos com UI são projectos acoplados, enquanto que os sistemas com VC e os com TA correspondem a projectos independentes. No entanto, se as UI tiverem baterias de reaquecimento, então ao sistema pode corresponder um projecto desacoplável. Por outro lado, caso o ar seja insuflado a uma temperatura inferior à ambiente os sistemas com TA podem ser acoplados. Esta classificação tem consequências importantes, quer em termos do comportamento dos sistemas, quer em termos do seu consumo de energia.

Como resultado da aplicação da AP foi possível identificar os principais axiomas do projecto de AVAC. Destes realça-se: a necessidade do tratamento do ar novo não interferir na remoção da carga térmica interna.

Este trabalho identifica ainda diversas estratégias para a redução do consumo de energia no edifício e nos sistemas de climatização. Define, usando o segundo axioma, o caudal de ar novo necessário por pessoa e a classe de filtração, de acordo com um nível de satisfação. Finalmente, apresenta uma solução inovadora a que corresponde um projecto independente, que garante permanentemente a qualidade ao ar interior e o conforto térmico desejados, associados ao mais baixo consumo de energia de todos os sistemas estudados.

Summary

One applies in this thesis the Axiomatic Design (AD) Theory to the most important air conditioning (HVAC) systems. This theory, developed by Nam P. Suh and first published in 1990, defines two axioms that rules any design: “maintain the independence of functional requirements (FR)” and “minimize the information content”.

Applying the first axiom of AD allows classifying a design as independent, decoupled or coupled. A good design will be independent or, if not achievable, decoupled. To both these designs one applies the second axiom, which ensures that the system will always work in the design range, whenever the design information is nil.

Using particularly the standards EN 13779, EN 15251 and the ASHRAE 62.1, it was possible identifying the highest level functions that a system might follow. They are: “to ensure correct thermal conditions”, “to ensure healthy indoor ambiances” and “to reduce the energy consumption of the HVAC system”. These functions allow constructing the AD matrixes of the design, in this example applied to the following systems: variable air volume systems (VAV) and for the dedicated outdoor air systems (DOAS). For the DOAS, one considered the fan coils systems (FC), the induction units systems (IU) and the chilled ceilings systems (CC).

These matrixes show that the VAV systems and the common IU systems are coupled designs, while the FC and the CC systems are independent ones. However, if the IU units have reheating coils, then the system may turn into a decoupled design. On the other side, if the temperature of the outdoor air flow is set lower than the indoor air temperature, then a CC system may become a coupled design. This classification has important consequences in what concerns to the behaviour and energy consumption of the systems.

As a result of applying AD, it was possible to identify the key axioms of the HVAC design. From these one choose the following: the independence between the outdoor air treatment and the removable of the internal heat loads.

Moreover, this work identifies several strategies to reduce the energy consumption in a building and in the HVAC systems. Using the second axiom, defines the outdoor air flow per person and the needed filter class, according to a level of satisfaction. Finally, presents an innovative solution which corresponds to an independent design, that ensures at any time the desired indoor air quality and the thermal comfort, associated with the lowest energy consumption of all studied systems.

Símbolos e Acrónimos

Lista de Símbolos

Símbolo	Designação
A	Matriz de projecto
$a_{i,j}$	Elemento da matriz de projecto
a_1, a_2	Quantis
A_{cl}	Área do indivíduo vestido
AD	Matriz de adjacência
A_D	Área do corpo humano segundo Dubois
AI	Área de intersecção
A_p	Área ocupada
A_r	Área do indivíduo vestido sujeita a radiação
B	Balanco térmico ou acumulação de calor no corpo humano
b	Coeficientes do polinómio de ajustamento
Bel	Função de crença
b_{nv}	Coeficientes do polinómio de ajustamento com coeficientes truncados
C	Calor sensível por convecção
C^*	Diferenças de concentrações entre o interior e o ar insuflado
C_a	Concentração de um espécimen nas condições do ar insuflado
$ccpch$	Parâmetro para o tipo de controlo da carga parcial no GPFC
C_{ex}	Concentrações de um espécimen na extracção
C_i	Concentração média de um espécimen no espaço interior
C_{Im}	Complexidade imaginária
Clf	Parâmetro para a classe de fugas
Clo	Unidade de isolamento da roupa
C_R	Complexidade real
C_{res}	Calor sensível libertado pela respiração
CS	Constrangimento
C_t	Custo de uma não conformidade
cvb	Parâmetro para o caudal variável na bomba
cvv	Parâmetro para o caudal variável no ventilador
D	Factor de diversidade de ocupação
D_e	Diâmetro hidráulico
$dpmb$	Parâmetro para a perda de carga no circuito de água
$dpmv$	Parâmetro para a perda de carga no circuito de ar
dtM	Parâmetro para a diferença de temperaturas no circuito de água
E	Vector do consumo de energia
\hat{E}	Vector do consumo de energia obtido da aproximação polinomial
$E(x)$	Valor esperado

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Símbolo	Designação
eer	Parâmetro para a eficiência do GPFC
EF	Eficiência funcional
eff	Parâmetro para a classe EFF dos motores eléctricos
E_i	Eficiência inicial de um filtro
e_j	Versor de uma direcção
E_{nv}	Vector do consumo de energia obtido do polinómio com coeficientes truncados
E_p	Calor latente libertado pela pele
E_{pd}	Termo difusivo das trocas de calor pela pele
E_{ps}	Termo de sudação das trocas de calor pela pele
E_{res}	Calor latente libertado pela respiração
Ev	Eficiência de ventilação do sistema
Evz	Eficiência de ventilação do sistema necessário a uma zona
exp	Conjunto de proposições que descrevem a experiência
f.d.p.	Função densidade de probabilidade
f.m.	Função de massa
f.p.	Função de pertença
f_{cl}	Relação entre as áreas de uma pessoa quando vestida e quando nua
F_{cl}	Factor global de trocas de calor sensível
F_{cl-i}	Factor de forma da superfície do indivíduo vestido para a superfície i
$F_{e,cl}$	Permeabilidade do vestuário às trocas de calor latente
G	Geração de um espécimen
Gr	Número de Grashof
H	Altura do indivíduo
h	Coeficiente global de convecção e de radiação
h'	Coeficiente global de trocas de calor sensível
h_c	Coeficiente de convecção
h_e	Coeficiente de transmissão de calor latente superficial
Hp	Hipóteses na teoria de Dempster
h_r	Coeficiente de radiação
I	Informação
i	Índice
ip	Factor de permeabilidade
[I]	Matriz identidade
Ic	Intervalo de confiança
I_{cl}	Resistência térmica da roupa
IP	Intervalo admissível de funcionamento, definido em projecto
IS	Intervalo de funcionamento do sistema
isl	Parâmetro para o isolamento
J	Matriz Jacobiana
j	Índice
K	Calor sensível por condução

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Símbolo	Designação
k_a	Taxa de absorção de um poluente
k_{ar}	Condutividade do ar
k_d	Taxa de difusão de um poluente
k_p	Constante da função de perdas L_p
L	Dimensão típica de uma placa
L_p	Função de perdas
L_w	Relação de Lewis
M	Metabolismo
m_0	Mínimo para a função de perdas L_p
m_{COV}	Massa de COV
met	Unidade de metabolismo
M_i	Massa molecular de um componente
n	Taxa de renovação do ar
n_1, n_2	Dimensão de amostras
Nu	Número de Nusselt
n_x	Número de estados ou dimensão da amostra
N_{δ}	Número de partículas de dimensão superior a δ
p	Probabilidade
p_a	Pressão parcial do vapor de água no ar
p_L	Proposição
ps	Número de pessoas
P	Número máximo de pessoas
PD	Percentagem de pessoas insatisfeitas com a velocidade residual do ar
$PdPt$	Perda de produtividade
PI	Percentagem de pessoas insatisfeitas com a QAI
PL	Plausabilidade
PM_{10}	Partículas de dimensão aerodinâmica até 10 μm
Pol	Função polinomial
Pol_{nv}	Função polinomial com coeficientes truncados
PP	Parâmetro de projecto
P_p	Massa do indivíduo
p_p	Pressão parcial do vapor de água na pele
PPI	Percentagem de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico
Pr	Número de Prandtl
$proj$	Conjunto de proposições que descrevem o projecto
p_s	Pressão de saturação à temperatura indicada
p_x	Número de variáveis independentes
q_{0t}	Caudal de ar exterior total
Q_c	Calor trocado por convecção de uma superfície plana
q_{cb}	Parâmetro para o controlo de caudal na bomba
q_{cv}	Parâmetro para o controlo de caudal no ventilador

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Símbolo	Designação
q_e	Conjunto de proposições da previsão da experiência
q_{ex}	Caudal de ar de exaustão
q_{or}	Caudal de ar exterior necessário à remoção de contaminantes
q_p	Conjunto de proposições a obter com o projecto proposto
q_p	Caudal de ar primário
Q_p	Calor global trocado por uma superfície plana
q_v	Caudal de ar
R	Calor sensível por radiação
r	Fracção de ar exterior no ar de retorno
r_{aj}	Resíduo no ajustamento
R_a	Caudal de ventilação por unidade de área
rc	Parâmetro para o recuperador na UTAN
r_{ch}	Parâmetro para o recuperador no GPFC
R_{cl}	Resistência da roupa às trocas de calor sensível
R_e	Resistência da roupa à libertação de calor latente
Re_L	Número de Reynolds para a dimensão L
r_f	Conjunto de proposições do estado final de uma experiência
RF	Requisito funcional
R_g	Reangularidade
r_i	Conjunto de proposições do estado inicial de uma experiência
R_p	Caudal de ventilação por pessoa
S	Área de uma superfície
s	Desvio padrão da amostra
S_g	Semangularidade
sg	Nível de significância
S_P	Matriz dos coeficientes do polinómio de ajustamento, linear com interacção
t	Tempo
t_a	Temperatura seca do ar ambiente
t_c	Temperatura de interior de conforto em °C
t_{ch}	Temperatura do chão em °C
t_{cl}	Temperatura na superfície do indivíduo em °C
T_{cl}	Temperatura na superfície do indivíduo em K
t_d	Temperatura das superfícies à direita do indivíduo em °C
t_e	Temperatura das superfícies à esquerda do indivíduo em °C
TE	Temperatura efectiva
TE^*	Temperatura efectiva para humidade relativa de 50%
TES	Temperatura efectiva saturada
tev	Parâmetro para a temperatura no evaporador/circuito de água
t_f	Temperatura das superfícies à frente do indivíduo em °C
T_i	Temperatura da superfície i em K
t_L	Proposição

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Símbolo Designação

t_m	Temperatura média mensal exterior em °C
$t_{mês(n)}$	Temperatura média para o mês corrente até ao dia n em °C
t_o	Temperatura operativa
t_p	Temperatura da pele
t_{pn}	Temperatura média dos painéis
T_{rm}	Temperatura radiante média em K
$\underline{t_{rm}}$	Temperatura radiante média em °C
t_t	Temperatura das superfícies atrás do indivíduo em °C
t_{tc}	Temperatura do tecto em °C
T_u	Intensidade de turbulência
V	Volume
$V(X)$	Variância
V_{10}	Taxa de ventilação vaga
v_{ar}	Velocidade residual do ar
VC_i	Vector coluna da matriz de projecto
V_m	Volume molar
VMP	Voto médio previsível
VNP	Valor nominal de projecto
W	Trabalho mecânico
X	Matriz dos estados dos parâmetros
X_p	Conjuntos de hipóteses na teoria de Dempster
Z	Fracção de ar exterior no ar primário do sistema
Z_z	Fracção de ar exterior no ar primário necessário a uma zona
$[0]$	Matriz nula

Lista de Símbolos Gregos

Símbolo Designação

γ	Estimador com distribuição qui-quadrado
Δ	Desvio do valor objectivo
δ	Dimensão aerodinâmica de partículas
ε	Eficácia de ventilação
ε_R	Emissividade média das superfícies
Θ	Dimensão do conjunto de hipóteses
λ	Quantil
μ	Média de uma distribuição
$\mu(x)$	Grau de pertença a uma f.p.
σ	Desvio padrão de uma distribuição
σ_R	Constante de Stefan-Boltzmann
Φ	Humidade relativa
Ω	Dimensão do espaço amostral
ω	Molhabilidade da pele

Lista de Acrónimos

Acrónimo Designação

AP	Teoria Axiomática de Projecto
AV	Análise do Valor
AVAC	Aquecimento ventilação e ar condicionado
BP+BS	Energia eléctrica consumida nas bombas do primário e secundário
COV	Compostos orgânicos voláteis
DFSS	Projecto para seis sigma (<i>Design for Six Sigma</i>)
DSM	Matriz estrutural de Projecto (<i>Design Structure Matrix</i>)
EAF	Energia eléctrica para arrefecimento consumida no GPFC
EAQ	Energia eléctrica para aquecimento consumida no GPFC
EFF	Classificação de eficiência energética de motores
ETS	Fumo de tabaco no ambiente (<i>Environmental Tobacco Smoke</i>)
FCS	Factor de calor sensível
GPFC	Grupo produtor de frio e/ou calor
IDA	Qualidade do ar interior (<i>Indoor Air Quality</i>)
IREQ	Isolamento necessário (<i>Insolation Required</i>)
ODA	Qualidade do ar exterior (<i>Outside Air Quality</i>)
QAI	Qualidade do ar interior
QFD	Colocação das funções para a Qualidade (<i>Quality Function Deployment</i>)
QSist	Cargas térmicas do sistema
QTct	Cargas térmicas dependentes dos TA
QUI	Cargas térmicas dependentes das UI
QUTA	Cargas térmicas dependentes da UTA
QUTAN	Cargas térmicas dependentes da UTAN
QVC	Cargas térmicas dependentes dos VC
RSM	Método da Superfície de resposta (<i>Response Surface Method</i>)
SED	Síndrome do Edifício Doente
TA	Tecto(s) arrefecido(s)
TRIZ	Teoria da resolução inventiva de problemas (<i>Teoriya Reshniya Izobretatelskiko Zadatch</i>)
UI	Unidade(s) de indução
UTA	Unidade de tratamento de ar
UTAN	Unidade de tratamento de ar novo
VAV	Volume de ar variável
VC	Ventiloconvector(es)
VC+Ve	Consumo eléctrico associado aos ventiloconvectores e a um ventilador
Ve	Consumo eléctrico associado ao ventilador de extracção
+Ve	Consumo eléctrico associado a um ventilador de exaustão
Vi	Consumo eléctrico associado ao ventilador de insuflação
VMR	Voto médio real

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Acrónimo Designação

WBGT	Temperatura de globo húmida (<i>Wet Bulb Global Temperature</i>)
WCI	Índice de arrefecimento com o vento (<i>Wind Chill Index</i>)

Índice de Matérias

Matérias	Página
1 Ciência e Projecto	1
1.1 Introdução	1
1.2 Ciência	2
1.2.1 Engenharia, Ciência e Tecnologia	2
1.2.2 Inovação e Ciência	4
1.2.3 Filosofia da Ciência	5
1.2.4 Experiência e comprovação	10
1.2.5 Características de uma Ciência e de uma Ciência Axiomática	11
1.3 Ciência do Projecto	13
1.3.1 A sistematização da Ciência de Projecto de Hubka e Eder	13
1.3.2 Geografia da Ciência de Projecto	15
1.3.3 Conceito de Projecto	16
1.3.4 Experiência e repetibilidade	17
1.3.5 Solução adoptada	19
1.4 Teorias de Projecto	20
1.4.1 Metodologias	20
1.4.2 Funções	25
1.4.3 Metodologias baseadas em funções	26
1.4.4 Teoria Axiomática de Projecto e Ciência	30
1.4.5 Teoria Axiomática como parte da Ciência	31
1.5 Resumo e Conclusões	32
1.6 Contributos, Opinião e Prosseguimento	33
 2 Teoria Axiomática de Projecto	 35
2.1 Introdução	35
2.2 Os Axiomas	36
2.3 Domínios e Mapeamento	36
2.3.1 Funções	38
2.3.2 Constrangimentos	39
2.4 Equação de Projecto	40
2.5 Acoplamentos	43
2.5.1 Consequências do Axioma 1	44
2.5.2 Representação gráfica da equação de Projecto	45
2.5.3 Tolerâncias	47
2.5.4 Identificação topológica das matrizes de Projecto	49
2.6 Informação e Complexidade	51
2.6.1 Informação de projectos independentes	53
2.6.2 Informação de projectos desacopláveis	53
2.6.3 Teoremas e corolários	55

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Matérias	Página
2.6.4 Estimativas da função densidade de probabilidade	55
2.6.5 Complexidade	58
2.7 Teoria Axiomática de Projecto e métodos em Projecto	59
2.7.1 Teoria Axiomática de Projecto e TRIZ	59
2.7.2 Teoria Axiomática de Projecto e DSM	60
2.7.3 Teoria Axiomática de Projecto e QFD	60
2.7.4 Teoria Axiomática de Projecto e Taguchi	61
2.7.5 Teoria Axiomática de Projecto e integração de métodos de Projecto	61
2.8 Resumo e Conclusões	63
2.9 Contributos, Opinião e Prosseguimento	64
 3 Funções em Climatização	 65
3.1 Introdução	65
3.2 Conforto térmico	66
3.2.1 Termoregulação e metabolismo	68
3.2.2 Modelo térmico do corpo humano	69
3.2.3 Modelo de Fanger	72
3.2.4 Modelos adaptativos	76
3.2.5 Funções associadas ao conforto térmico	81
3.3 Qualidade do Ar	81
3.3.1 Equação de concentração de um espécimen	83
3.3.2 Poluentes e suas concentrações	85
3.3.3 Materiais poluentes	92
3.3.4 Taxa de ventilação	93
3.3.5 Filtros	98
3.3.6 Funções associadas à QAI	100
3.4 Produtividade, Conforto e QAI	101
3.5 Iluminação e Ruído	105
3.6 Mapeamento entre o Domínio Funcional e Físico	105
3.7 Resumo e Conclusões	107
3.8 Contributos, Opinião e Prosseguimento	109
 4 Sistemas AVAC	 111
4.1 Introdução	111
4.2 Topologias de Sistemas AVAC e seu Léxico	112
4.3 O mercado em Portugal	116
4.4 Sistemas VAV	117
4.4.1 Adaptação do sistema VAV à carga térmica	118
4.4.2 Sistema VAV e caudal de ar exterior	121
4.4.3 Discussão do sistema VAV	123
4.4.4 Mapeamento do projecto de um sistema VAV	124

Matérias	Página
4.5 Sistemas com Ar Novo Dedicado	125
4.5.1 Discussão de sistemas com ar novo dedicado	127
4.6 Sistemas com Ventiloinvectores	128
4.6.1 Unidades terminais	128
4.6.2 Mapeamento do projecto de um sistema com ventiloinvectores	130
4.7 Sistemas Emergentes	131
4.7.1 Tectos arrefecidos	131
4.7.2 Mapeamento do projecto de um sistema com tectos arrefecidos	134
4.7.3 Unidades terminais de indução	135
4.7.4 Mapeamento do projecto de um sistema com unidades de indução	137
4.7.5 Discussão dos sistemas emergentes	138
4.8 Energia e Sistemas	139
4.9 Resumo e Conclusões	141
4.10 Contributos, Opinião e Prosseguimento	142
 5 Energia	 143
5.1 Introdução	143
5.2 A Escassez de Recursos Energéticos	144
5.3 O Efeito de Retroacção no Consumo de Energia	150
5.4 A Norma ASHRAE 90.1	153
5.5 A Directiva Europeia 91 de 2002	155
5.5.1 A transposição da Directiva em alguns países da UE	156
5.5.2 A legislação nacional	158
5.5.3 A norma EN 15251	161
5.6 Barreiras à Introdução de Tecnologias mais Eficientes	163
5.7 Rumo à Sustentabilidade	164
5.8 Energia em Edifícios - Funções e Parâmetros	166
5.8.1 O mapeamento da função de redução do consumo de energia em edifícios	167
5.8.2 O mapeamento aplicado aos sistemas de climatização	170
5.9 Resumo e Conclusões	176
5.10 Contributos, Opinião e Prosseguimento	177
 6 A Energia e o Edifício	 179
6.1 Introdução	179
6.2 O Clima de Lisboa	180
6.3 O Energy Plus	181
6.4 Parâmetros dos Edifícios	182
6.5 Os Edifícios Simulados	184
6.6 Modelação dos Edifícios	185
6.7 Resultados da Modelação dos Edifícios	186
6.8 Sistema de Climatização	189

Matérias	Página
6.9 Parâmetros do Sistema de Climatização	190
6.10 Modelação do Sistema de Climatização	194
6.11 Resultados da Modelação do Sistema de Climatização	198
6.12 Superfície de Resposta	201
6.13 Principais Parâmetros	204
6.14 Resumo e Conclusões	208
6.15 Contributos, Opinião e Prosseguimento	209
 7 Aplicação do Primeiro Axioma	 211
7.1 Introdução	211
7.2 A Independência nos Sistemas de Climatização	212
7.2.1 Sistemas VAV	213
7.2.2 Sistemas com ar novo dedicado e ventiloconvectores	215
7.2.3 Sistemas com ar novo dedicado e tectos arrefecidos	216
7.2.4 Sistemas com ar novo dedicado e unidades de indução	217
7.3 Consequências da Aplicação do Primeiro Axioma	221
7.3.1 Identificação de falhas do sistema VAV	224
7.3.2 Identificação de falhas do sistema com ventiloconvectores	231
7.3.3 Identificação de falhas do sistema com tectos arrefecidos	233
7.3.4 Identificação de falhas do sistema com unidades de indução	236
7.4 Avaliação do Consumo de Energia	238
7.4.1 Consumo de energia do sistema VAV	239
7.4.2 Consumo de energia do sistema com ventiloconvectores	242
7.4.3 Consumo de energia do sistema com tectos arrefecidos	243
7.4.4 Consumo de energia do sistema com unidades de indução	245
7.5 Resumo e Conclusões	247
7.6 Contributos, Opinião e Prosseguimento	250
 8 Aplicação do Segundo Axioma	 251
8.1 Introdução	251
8.2 Ventilação e Filtração	253
8.3 Definição de uma Taxa de Ventilação Vaga	255
8.4 Definição de Classes de Filtros Vagos	256
8.5 Complexidade Vaga	258
8.6 Resultados e Discussão	261
8.7 Resumo e Conclusões	264
8.8 Contributos, Opinião e Prosseguimento	265
 9 Uma Solução: MU 10211	 267
9.1 Introdução	267
9.2 O Modelo de Utilidade	268

Matérias	Página
9.3 Aplicação do Primeiro e Segundo Axiomas	270
9.4 Avaliação do Funcionamento do MU 10211	272
9.5 Resumo e Conclusões	275
9.6 Contributos, Opinião e Prosseguimento	276
10 Fecho	277
10.1 Resumo do Trabalho	278
10.2 Principais Conclusões de acordo com a Teoria Axiomática	284
10.3 Principais Contributos, Opinião e Prosseguimento	285
Apêndice 1 Matriz de Projecto	289
1.1 Introdução	289
1.2 Noções de Grafos	289
1.3 Matriz de Projecto e Grafos	294
1.4 Identificação de Topologias	294
1.5 Identificação de Acoplamentos	295
1.5 Programa de Identificação	297
Apêndice 2 Conjuntos Vagos	299
2.1 Introdução	299
2.2 Operações com Conjuntos	299
2.3 Implicação	300
2.4 Graduação de Conjuntos	301
2.5 Simulação com Conjuntos Vagos	302
Anexo Corolários e Teoremas da Teoria Axiomática de Projecto	305
1.1 Introdução	305
1.2 Corolários	305
1.3 Teoremas sobre Projecto em Geral	306
1.4 Teoremas Relacionados com o Projecto e Decomposição de Grandes Sistemas	308
1.5 Teoremas Relacionados com a Complexidade	309
Bibliografia	311

Índice de Figuras

Figuras	Página
Figura 1.1. f.d.p. do sistema	31
Figura 2.1. Processo de mapeamento	37
Figura 2.2. Projecto na AP	39
Figura 2.3. Representação gráfica do processo de mapeamento	45
Figura 2.4. Tolerâncias de PP e RF	48
Figura 2.5. Sequências de obtenção dos RF	50
Figura 2.6. f.d.p. do sistema e valores de projecto	52
Figura 2.7. Função de pertença do sistema e do projecto	56
Figura 3.1. Caudal volúmico e geração de um espécimen	83
Figura 3.2. Variação da produtividade com VMP	101
Figura 3.3. Mapeamento entre o domínio funcional e físico, para a função "Climatizar edifício de serviços"	106
Figura 4.1. Sistema de climatização	112
Figura 4.2. Esquema de um sistema VAV	117
Figura 4.3. Controlo da caixa VAV	119
Figura 4.4. Controlo da UTA	120
Figura 4.5. Caudais de ar num sistema com retorno à unidade	121
Figura 4.6. Mapeamento do projecto do sistema VAV a partir do nível 2	125
Figura 4.7. Sistema com VC	128
Figura 4.8. Controlo de temperatura da UTAN	129
Figura 4.9. Mapeamento do projecto de um sistema com ventiloconvectores	130
Figura 4.10. Sistema com TA	131
Figura 4.11. Mapeamento do projecto de um sistema com tectos arrefecidos	135
Figura 4.12. Sistema com UI	136
Figura 4.13. Mapeamento do projecto de um sistema com unidades de indução	138
Figura 5.1. Preço do petróleo real e nominal	145
Figura 5.2. Opções de verificação de sistemas de climatização pela ASHRAE 90.1	153
Figura 5.3. "Impressão digital" do edifício relativamente à qualidade do ambiente interior	162
Figura 5.4. Mapeamento da função "reduzir o consumo de energia no edifício"	171

Figuras	Página
Figura 5.5. Mapeamento da função “reduzir o consumo de energia do sistema AVAC”	175
Figura 6.1. Processamento	195
Figura 6.2. Consumos do edifício e do sistema de climatização	198
Figura 7.1. Mapeamento de projecto de sistemas AVAC até ao nível 2	211
Figura 7.2. Mapeamento do projecto do sistema VAV a partir do nível 2	213
Figura 7.3. Mapeamento do projecto de um sistema com ventiloconvectores	215
Figura 7.4. Mapeamento do projecto de um sistema com tectos arrefecidos	216
Figura 7.5. Mapeamento do projecto de um sistema com unidades de indução	218
Figura 7.6. Processamento	222
Figura 7.7. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com os sistemas em função do caudal de ar novo introduzido por pessoa	226
Figura 7.8. Ar novo necessário e insuflado no sistema 2A	227
Figura 7.9. Ar novo necessário e insuflado no sistema 2B ao longo de um dia de Janeiro	228
Figura 7.10. Concentração de CO ₂ entre as 700 e as 950 h de funcionamento do sistema VAV, 2B, com um caudal de ar novo de 45 m ³ /(h·ps)	229
Figura 7.11. Concentração de CO ₂ entre as 700 e as 950 h de funcionamento do sistema VC, B, com um caudal de ar novo de 45 m ³ /(h·ps)	232
Figura 7.12. Esquema de processamento	239
Figura 8.1. Decomposição de RF 1.2	252
Figura 8.2. Consequentes da implicação e áreas necessárias à Informação	261
Figura 8.3. Superfícies de informação para 80 e 90% de Satisfação com a regra de implicação R2	262
Figura 8.4. Superfícies de informação para 80 e 90% de Satisfação com a regra de implicação R1	263
Figura 8.5. Superfícies de informação para 80 e 90% de Satisfação com a regra de implicação R3	263
Figura 9.1. Esquema de princípio do sistema proposto	269
Figura 9.2. Esquema de princípio do controlo	269
Figura 9.3. Decomposição PP-RF a partir do nível dois de decomposição do MU 10211	270

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Figuras	Página
Figura A 1.1. Grafo orientado	290
Figura A 1.2. Grafo orientado acíclico	291
Figura A 1.3. Grafo orientado cíclico	292
Figura A 1.4. Combinação de ciclos	296
Figura A 2.1. Função pertença e operações com conjuntos	300
Figura A 2.2. Soma de números vagos	302

Índice de Quadros

Quadros	Página
Quadro 3.1. Libertação de CO ₂ e H ₂ O por pessoa em função da actividade	86
Quadro 3.2. Limites de concentração interior recomendados por organizações e regulamentos	90
Quadro 3.3. Caudal de ar exterior para diluição de bioefluentes e poluentes do edifício, segundo a EN 15251	95
Quadro 3.4. Caudal de ar exterior para diluição de bioefluentes segundo a EN 13779	95
Quadro 3.5. Filtros de ar segundo a EN 13779	99
Quadro 3.6. Melhoria da produtividade relativa à categoria C de edifícios segundo CR 1752	103
Quadro 5.1. Limites em tempo de não cumprimento do parâmetro	162
Quadro 6.1. Variação dos parâmetros físicos	183
Quadro 6.2. Áreas dos pisos em estudo	184
Quadro 6.3. Equipamentos nos exemplos em estudo	185
Quadro 6.4. Resultados da simulação para os edifícios na situação de referência	187
Quadro 6.5. Variações dos parâmetros nos edifícios	188
Quadro 6.6. Estados dos parâmetros no sistema de climatização	192
Quadro 6.7. Valores de \sqrt{r} para as superfícies de ajustamento	204
Quadro 6.8. Coeficientes $b \cdot 10^{-5}$ truncados (considera recuperação total)	205
Quadro 6.9. Coeficientes $b \cdot 10^{-5}$ truncados (sem recuperação total)	209
Quadro 7.1. Eficiência funcional (EF) dos sistemas VAV em função do caudal de ar novo	226
Quadro 7.2. Concentração máxima de CO ₂ em ppm, por zona, para os sistemas VAV quando o caudal de ar novo é de 45 m ³ /(h·ps)	229
Quadro 7.3. Pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO ₂ nos sistemas VAV	229
Quadro 7.4. Percentagem de pessoas·hora em cada classe de conforto por zona nos sistemas VAV1 e VAV2	230
Quadro 7.5. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto dos sistemas VAV1 e VAV2	231
Quadro 7.6. Percentagem de pessoas·hora em cada classe de conforto por zona nos sistemas com VC do tipo A e B	231
Quadro 7.7. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com um sistema com VC	232

Quadros	Página
Quadro 7.8. Concentração máxima de CO ₂ por zona para os sistemas com VC	233
Quadro 7.9. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO ₂ nos sistemas com VC	233
Quadro 7.10. Eficiência funcional (EF) relativamente ao conforto térmico nos sistemas com tectos arrefecidos	234
Quadro 7.11. Percentagem de pessoas-hora em cada classe de conforto por zona, nos sistemas com tectos arrefecidos	235
Quadro 7.12. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com um sistema com tectos arrefecidos	235
Quadro 7.13. Concentração máxima de CO ₂ por zona para os sistemas com tectos arrefecidos	235
Quadro 7.14. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO ₂ nos sistemas com tectos arrefecidos	236
Quadro 7.15. Eficiência funcional (EF) relativamente ao conforto nos sistemas com unidades de indução	236
Quadro 7.16. Percentagem de pessoas-hora em cada classe de conforto por zona, nos sistemas com unidades de indução	237
Quadro 7.17. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com um sistema com unidades de indução	237
Quadro 7.18. Concentração máxima de CO ₂ por zona para os sistemas com unidades de indução	237
Quadro 7.19. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO ₂ nos sistemas com unidades de indução	237
Quadro 7.20. Estados das variáveis de controlo	238
Quadro 7.21. Estado das variáveis de controlo para os sistemas VAV	240
Quadro 7.22. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas VAV	241
Quadro 7.23. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas VAV	242
Quadro 7.24. Estado das variáveis de controlo nos sistemas com VC	242
Quadro 7.25. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas com VC	243
Quadro 7.26. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas com VC	243
Quadro 7.27. Estado das variáveis de controlo nos sistemas com tectos arrefecidos	244
Quadro 7.28. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas com tectos arrefecidos	244
Quadro 7.29. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas com tectos arrefecidos	245
Quadro 7.30. Estado das variáveis de controlo nos sistemas com unidades de indução	246

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Quadros	Página
Quadro 7.31. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas com unidades de indução	246
Quadro 7.32. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas com unidades de indução	247
Quadro 7.33. Resumo do consumo, qualidade do ar e conforto para os sistemas analisados	248
 Quadro 8.1. Resumo de taxas de ventilação segundo a EN 13779	 253
Quadro 8.2. Taxas mínimas, máximas e por defeito de R_a e de R_p	254
Quadro 8.3. Classes de filtros em função da qualidade do ar interior e exterior	254
Quadro 8.4. Variáveis vagas da equação (8.1) definidas como $\mu_T(a; b; c)$	255
Quadro 8.5. $(a; b; c)$ para V_{10} e nível de satisfação	256
Quadro 8.6. Eficiências de filtração nos filtros G4 a F9 e filtros vagos associados	257
Quadro 8.7. Regras de implicação R2 para $RF \cdot 1.2$ e suas classes	259
Quadro 8.8. Regras de implicação menos exigente, R1, e mais exigente, R3	262
Quadro 8.9. Caudal V_{10} e filtro FF mínimo para informação nula	264
 Quadro 9.1. Percentagem de pessoas-hora em cada classe de conforto, por zona no sistema MU 10211	 272
Quadro 9.2. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com o sistema MU 10211	272
Quadro 9.3. Concentração máxima de CO_2 por zona para o sistema MU 10211	273
Quadro 9.4. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO_2	273
Quadro 9.5. Estados das variáveis de controlo no sistema MU 10211	273
Quadro 9.6. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento no sistema MU 10211	274
Quadro 9.7. Energia anual despendida nos equipamentos do sistema MU 10211	274
Quadro 9.8. Resumo do consumo, qualidade do ar e conforto para os sistemas independentes que cumprem a informação de acordo com o capítulo oitavo	274
 Quadro A 2.1. Exemplo de implicação entre antecedentes e consequentes	 303

Nº de arquivo:

“Copyright”:

Prólogo

Esta tese afirma que ao Projecto dos diversos Sistemas de Climatização se aplica a Teoria Axiomática de Projecto (AP). Esta teoria, desenvolvida por Nam P. Suh nos anos de 1980, foi publicada no livro *The Principles of Design*, em 1990. Tem sido aplicada nas mais diversas áreas. Das aplicações iniciais à concepção de sistemas mecânicos, passou para o projecto de sistemas informáticos e, mais recentemente, para o projecto de organizações. Deste facto, é relevante o número de artigos que surgiram no último congresso do ICAD, *International Conference on Axiomatic Design*, que decorreu em Março de 2009 em Portugal, no Monte de Caparica, na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A AP baseia-se em dois axiomas: o axioma da independência e o da minimização da informação. Estes axiomas desenvolvem-se em dez teoremas principais e vários corolários. Esta teoria relaciona-se e associa-se a fracções de outras teorias mais divulgadas, nomeadamente o TRIZ, as matrizes DSM e as tolerâncias de Genichi Taguchi.

Com base no conhecimento dos artigos publicados sobre a Teoria Axiomática de Projecto, pode afirmar-se que esta é a sua primeira aplicação aos sistemas de climatização.

Este trabalho comporta dez capítulos, apêndices e um anexo. Os primeiros dois capítulos descrevem a Teoria Axiomática de Projecto e relacionam-na com outras teorias conhecidas.

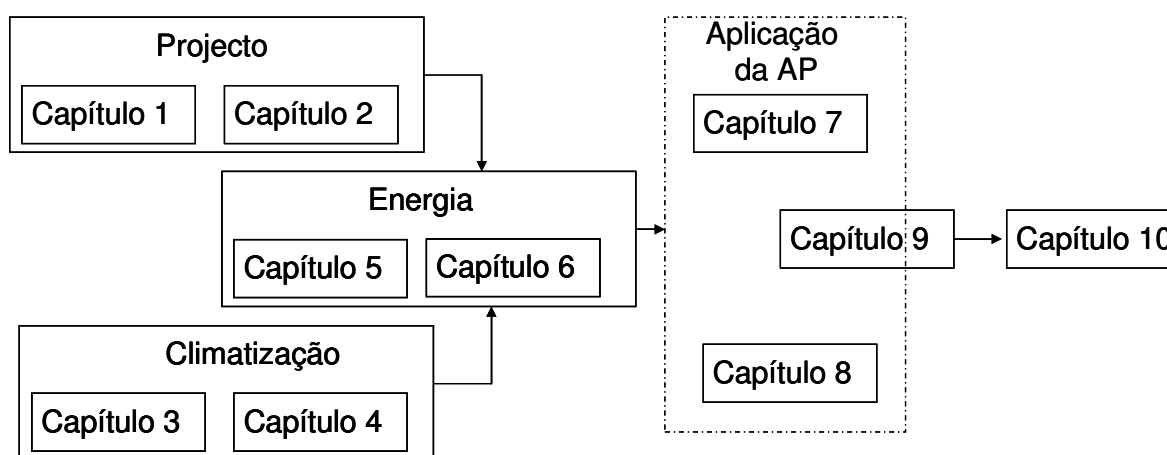
Depois de uma descrição geral e enquadadora da teoria, são apresentados nos capítulos seguintes, terceiro e quarto, os sistemas de climatização. No terceiro as suas principais funções, o conforto térmico e a qualidade do ar; no quarto o modo de funcionamento de cada um dos sistemas analisados. Para este efeito, toma-se como objecto de estudo quatro sistemas de climatização: o sistema VAV, comum no mercado dos EUA; os sistemas com ventiloconvectores muito usados no Sul da Europa; e os sistemas de tectos arrefecidos e de unidades de indução originalmente desenvolvidos nos países Escandinavos.

O quinto capítulo introduz uma outra função, o consumo de energia. Aplica a AP aos sistemas de climatização e estrutura as soluções técnicas com vista à diminuição do consumo de energia nestes sistemas. Face à actualidade desta matéria, relaciona a energia com a eficiência energética e com as políticas de sustentabilidade.

Até este capítulo apresenta-se os fundamentos necessários ao desenvolvimento da tese, suportados na bibliografia respectiva. Esta é referenciada por capítulos, aparecendo no final também ordenada por autor.

Na realidade, é só a partir do capítulo quinto que são apresentados os principais contributos desta tese. Ou seja, só a partir deste capítulo se introduz de forma significativa a aplicação da AP aos sistemas de climatização. Deste modo, alguém da área do Projecto poderá dispensar numa primeira leitura os capítulos um e dois e uma pessoa da área dos sistemas de climatização os capítulos três e quatro e mesmo grande parte do quinto.

Na figura seguinte é indicado, como sugestão, um mapa de leitura desta tese:



Esquema de leitura dos capítulos por temas

A aplicação da AP aos sistemas de climatização ocorre sobretudo nos capítulos 7 a 9. No entanto, surge desde o terceiro. Por esta razão, a fronteira que delimita a sua aplicação é desenhada a traço ponto. Por outro lado, o capítulo nono excede a aplicação estrita da AP, tendo um carácter de inovação, pelo que, em parte, está externo à fronteira referida.

No capítulo sexto faz-se uma avaliação paramétrica das características do edifício que determinam o consumo de energia e, ajustando uma hiper-superfície ao consumo de energia do sistema, quantifica-se as implicações cruzadas das diversas opções de sistemas de climatização sobre o seu consumo.

O capítulo sétimo é dedicado à aplicação do primeiro axioma da AP aos quatro sistemas de climatização considerados. Neste capítulo, as principais funções referidas relativas ao conforto, qualidade do ar e consumo de energia, são quantificadas, para um exemplo, com cada um dos sistemas. O capítulo oitavo aplica o segundo axioma, ou seja o axioma da minimização da informação, a dois requisitos importantes do projecto de climatização: a diluição da poluição e o controlo de partículas.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Finalmente, no capítulo nono, apresenta-se uma solução inovadora, muito simples, que cumpre os dois axiomas da AP. Esta solução foi patenteada como modelo de utilidade no Instituto Nacional da Propriedade Industrial, INPI.

O último capítulo, ou décimo, resume a tese, agrega as conclusões, enuncia os contributos, fornece opiniões e indica linhas de desenvolvimento desta tese.

Como indicado, os contributos da tese vão crescendo a partir do capítulo quinto. São sobretudo suportados em artigos apresentados em conferências e por um publicado na revista *Energy and Buildings*. Em geral, as matérias destes artigos foram desenvolvidas nesta tese, em diferentes graduações. Apresenta-se de seguida, por ordem cronológica, os artigos do autor com maior relevo para a exposição realizada:

1 - Miguel Cavique, Jorge Gil Saraiva, "Parametric Variation and Energy Consumption in Office Buildings", XXXII IAHS World Congress on Housing: Sustainability of the Housing Projects, Trento, Italy, 2004.

2 –Miguel Cavique, António Freire Mourão, António M. Gonçalves-Coelho, "Reducing Complexity in Outdoor Air System", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, Itália, 2006.

3 –Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, "Axiomatic Design and HVAC Systems", *Energy and Buildings*, Vol. 41, n. 2, (146-153), 2009.

4 - Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, "An Energy Efficiency Framework for the Design of HVAC Systems", The Fifth International Conference on Axiomatic Design, Campus de Caparica, Março 2009.

5- Miguel Cavique, António M. Gonçalves Coelho, "Air conditioning systems and geography: an introductory comparison", 37ª IAHS World Congress on Housing Science: Design, Technology, Refurbishment and Management of Buildings, Santander, Espanha, Outubro de 2010.

Foi ainda utilizado o modelo de utilidade referido:

6- Miguel Cavique, Modelo de Utilidade Nacional MU10211: "Sistema de Climatização com ar novo dedicado", INPI, 2008.

No quadro seguinte, expressa-se a relação entre os capítulos da tese e os trabalhos referidos, sendo assinalado com "X" uma relação forte e por um "x" uma relação fraca:

		Capítulos da tese									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Artigos e Modelo de Utilidade	1						x				
	2								X		
	3			x	x			X			
	4					X					
	5							x			
	6									X	

Relação entre os capítulos da tese e os artigos do autor

Prefácio do Autor

Sempre me intriguei por que nos primeiros anos de trabalho de um engenheiro a concepção de um projecto é extremamente difícil. No entanto, com algum tempo de experiência, a solução ocorre célere, normalmente próxima da solução que posteriormente é adoptada. Esta dúvida conduziu-me a supor que as necessidades de um projecto poderiam ser interpretadas como incrementos, ao longo do tempo, obtidas a partir de soluções existentes. Ou seja, seria possível alterar as soluções existentes, para melhor cumprirem as necessidades de projecto, usando variações incrementais. Coloquei, por facilidade, a hipótese destas variações serem lineares. Ou de outra maneira, os incrementos de aproximação à solução seriam obtidos do produto de uma matriz pelas melhorias no desempenho das soluções.

Por razões do acaso, a formulação desta ideia levou-me ao contacto do meu amigo de longa data, o Professor António Mourão. Foi ele que primeiro me apresentou a Teoria Axiomática de Projecto (AP) e me indicou a existência de alguns livros do Professor Nam P. Suh sobre este assunto. Li-os rapidamente. Estava lá quase tudo o que pretendia. Mais ainda, a ideia de independência e de operacionalidade expressa nesta teoria eram-me quase familiares. Apercebi-me, posteriormente, da impossibilidade de poder criar um gerador de ideias, mas verifiquei que a validação de novas ideias, ou de ideias existentes, podia ser apoiada com sucesso pela aplicação da AP.

De repente, algumas reflexões sobre os sistemas de climatização tinham um suporte! O papel que desempenha o ar novo, os efeitos conjugados entre o ar novo e a carga térmica, ou os acoplamentos hidráulicos e térmicos nas redes, todos, podiam ser avaliados de acordo com a AP. Estes acoplamentos, os problemas que causam a um sistema e a sua extensão eram agora facilmente identificáveis.

Surgiu, então, o problema de escolher as funções de um sistema de climatização. Optei por defini-las em função das necessidades do utilizador, com avaliação objectiva porque enquadráveis em normas. Foram elas o conforto térmico e a qualidade do ar e, posteriormente, a energia despendida pelos sistemas.

Há ainda uma dúvida sobre a AP! Em que medida podemos aceitar uma nova teoria? Em que medida pode ser considerada científica? Estas dúvidas obrigaram-me a uma abordagem filosófica da AP exposta no início desta tese.

Desde as primeiras leituras dos livros sobre a AP apercebi-me da dificuldade de descrever a função densidade de probabilidade do comportamento de um sistema,

necessária à aplicação do segundo axioma. Uma memória, convenientemente difusa dos idos anos de 1980, indicava-me a possibilidade de substituí-la por uma função de pertença, usando conjuntos vagos. Viria a confirmar esta possibilidade num artigo de uma conferência do ICAD e a apresentar um artigo com a sua aplicação, no ICAD 2006, em Florença.

A ida a esta conferência permitiu-me conhecer a comunidade da AP. Mais tarde, por um golpe de sorte, tive, julgo, um papel decisivo para trazer esta conferência para Portugal. Realizou-se o ICAD 2009 na FCT da UNL, em Março de 2009. O convívio com o Professor Suh foi inesquecível. Aí estava, personalizado, quem tinha desenvolvido uma nova teoria científica, com dois, apenas dois, axiomas. Uma comparação que ocorreu de estarmos na presença de um “Newton” seria desdenhosa para o Professor Suh, já que é de uma enorme afabilidade, escutando e perguntando opiniões, apenas possível em alguém de grande elevação.

Julgo ter tido muita sorte por ter podido aplicar esta teoria. Na realidade, o desenvolvimento da Ciência surge por três grandes vias com diferentes níveis de abstracção: criação de novas teorias científicas; aplicação de uma teoria científica a uma área do conhecimento; e, articulação de uma teoria a aplicações de uma área do conhecimento. Destas, pude enquadrar-me na segunda via: a aplicação da AP a uma área do conhecimento existente, neste caso o Projecto de sistemas de climatização.

A AP é uma teoria de grande formalismo, que obriga a uma permanente coerência. Esta característica permitiu-me identificar ou fundamentar falhas no desenvolvimento dos sistemas de climatização. Neste domínio, talvez a principal lição que se retira desta tese seja a seguinte: Nos sistemas de climatização, o tratamento do ar novo não pode interferir com o tratamento das cargas térmicas.

No final, há que perguntar por que razão se prefere, tantas vezes e nas mais diversas áreas, sistemas com acoplamentos? Por que é que sistemas organizacionais evoluem de formas simples para complexas? Em nossa opinião a resposta é clara: Poder. Quem domine o funcionamento de um sistema complexo, mesmo que parcialmente, passa a deter uma vantagem competitiva. Neste sentido, a aplicação da AP é subversiva.

Ao terminar esta tese, obtive uma maneira diferente de ver o mundo. Isto é uma réstia da memória do que foi feito serão, provavelmente, o que sobra de um trabalho iniciado há cerca de cinco anos.

Capítulo 1

Ciência e Projecto

“Si, en contemplant les phénomènes, nous ne les rattachions point immédiatement à quelques principes, non seulement il nous serait impossible de combiner ces observations isolées, et, par conséquent, d’en tirer aucun fruit, mais nous serions mêmes entièrement incapables de les retenir; ...”

Auguste Comte, 1826

1.1 Introdução

É grande a capacidade de idealização humana! Esta capacidade permitiu ao Homem conceber inúmeros artefactos, de acordo com as suas necessidades. Para os realizar, existiu sempre uma concepção, uma ideia inicial, na maioria das vezes não materializada num projecto.

Como são geradas as ideias, como avaliá-las, como comprová-las?

Estas perguntas são ao mesmo tempo os grandes objectivos da Neurociência, da Ciência do Projecto e da Ciência Natural. Quando for possível obter a resposta conjunta a estas perguntas poderá criar-se um sistema automático de concepção.

Neste trabalho limitar-nos-emos a discutir a avaliação de ideias em Projecto mecânico e o seu modo de comprovação. Fá-lo-emos em aplicação da Teoria Axiomática de Projecto (AP). Esta nova teoria de Projecto, proposta em 1990 por Suh, tem sido aplicada com sucesso em várias áreas. Aplicá-la-emos a diversos sistemas utilizados na Engenharia de Climatização.

No entanto, a proposta de uma nova teoria nunca é isenta de polémica. A sua aceitação é realizada progressivamente, por grupos de pessoas que vêem na nova teoria uma forma de resolução de problemas, muitas vezes com alterações da própria teoria. É neste decurso, aliás altamente motivador, que hoje vivemos relativamente à Teoria Axiomática de Projecto.¹

Neste sentido, é necessário verificar se esta teoria tem as características de uma teoria científica, que dê suporte às aplicações posteriores. Comprovando-se, ou de outro modo aceitando-se, que a AP é científica, então as aplicações desta teoria à Climatização terão

1 - Veja-se <http://machinedesign.com/ContentItem/61986/VoodooEngineering>

Ciência e Projecto

comprovação física e os diversos Sistemas de Climatização existentes poderão ser comparados.

Por outro lado, havendo várias linhas de desenvolvimento da Ciência é necessário discutir qual o conceito de Ciência necessário à avaliação da teoria referida. É portanto necessário discutir o que é a Ciência e o que a distingue de outras actividades relacionadas, nomeadamente da Tecnologia, da Engenharia ou da Inovação.

Pretende-se neste primeiro capítulo caracterizar a componente científica da aplicação enunciada, distinguindo entre Engenharia e Ciência; localizando na Ciência a Ciência de Projecto; analisando em que medida uma Teoria de Projecto pode ser considerada científica.

Com vista à prossecução destes objectivos, no ponto 1.2 distingue-se a Ciência de outros conceitos, descreve-se a evolução da filosofia da Ciência, caracteriza-se o seu método e define-se as suas particularidades. No ponto seguinte, define-se Projecto, caracteriza-se e localiza-se a sua Ciência. Finalmente, no último ponto, expõe-se diversos métodos e metodologias, enuncia-se a Teoria Axiomática de Projecto e verifica-se da possibilidade de esta ser utilizada em Ciência.

1.2 Ciência

Um dos critérios de demarcação da Ciência é a existência de leis de validade universal. Assim, uma hipótese pode ser refutada por não concordar com uma lei da Ciência e uma teoria científica pode ser deposta se uma única experiência não concordar com a teoria.

Neste aspecto a Ciência distingue-se da Arte. Na Arte, na Estética ou na Moda, o método científico não é aplicável. Nem por isso as actividades que lhes estão associadas são menos importantes. Interferem nomeadamente, e com muito êxito, na concepção de produtos. Apenas têm métodos diferentes, sem possibilidade de comprovação universal.

Mas se a actividade científica é facilmente distinguida destas actividades, o que dizer de outras actividades que utilizam ou são em parte dependentes da Ciência? O que distingue a Ciência da Engenharia? Ou da Tecnologia? Em que medida se interliga a Ciência com a Inovação? E finalmente, quais as características de uma Ciência?

Iremos tentar responder a estas perguntas nos parágrafos seguintes.

1.2.1 Engenharia, Ciência e Tecnologia

A Engenharia pode ser definida como o conjunto de actividades de alteração e domínio da Natureza efectuadas pelo Homem, utilizando em seu proveito as leis da mesma, com vista à obtenção de uma nova ordem por si idealizada. Neste contexto, a Engenharia e a Tecnologia assumem uma dimensão social.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A Engenharia não é, em sentido estrito, uma Ciência Natural, nem uma Ciência Social, nem um conjunto de tecnologias, mas pode ser vista como a sua aplicação conjunta na actividade de concepção. Esta baseia-se na aplicação das Ciências Naturais e da Matemática a uma realidade com representação espacial. A concepção é o método em Engenharia.

Ontologicamente, a Engenharia estuda [1.1]: o comportamento de objectos; as interacções entre objectos; as interacções entre objectos e contextos; a ergonomia e o conforto nas relações entre humanos e objectos, assim como as relações entre humanos e contextos; e, finalmente, as relações entre objectos, humanos e contextos.

Após a resolução progressiva das primeiras interacções, de índole física, os problemas em Engenharia foram tendendo para as relações entre objectos, humanos e contextos. Estes problemas obrigam a novos tipos de análise relativas aos custos ao longo da vida, à segurança e a problemas ambientais. Qual a métrica a aplicar a estes novos problemas, ou qual a sua funcional de optimização, são problemas de difícil acordo. Por exemplo, o problema do conforto em ambientes climatizados no contexto de um crescendo do custo da energia, enquadra-se neste tipo de problemas.

Muito embora a Ciência e a Engenharia se relacionem, os seus processos epistémicos são diferentes. Enquanto a Ciência baseia-se na análise e na separação de um problema inicial em problemas de solução mais simples, na Engenharia o processo epistémico principal é a síntese, conjugando-se processos conhecidos [Cap.1, 1.20]. De modo idêntico estabelece Taguchi a diferença fundamental entre a Ciência Natural e a Engenharia: A investigação científica tem por objectivo “descrever os princípios que governam os fenómenos naturais tão claramente quanto possível”, para os quais não existem limitações de custos intrinsecamente impostos. Na Engenharia, existindo diversas formas de concretizar um produto, a escolha da solução depende do nível de qualidade e do custo pretendidos [1.17]. Estas diferenças ontológicas e epistémicas não impedem, no entanto, que a Engenharia utilize a Ciência Natural nas suas concepções e na descrição de fenómenos para a compreensão correcta dos objectos da concepção.

A Tecnologia, enquanto criação, enquadra-se na Engenharia, mas enquanto processo de investigação enquadra-se na Ciência. Segundo Thomas Khun, a Ciência distingue-se da Tecnologia apenas por um factor de tempo e de amplificação da sua contribuição para o que se tem designado por progresso [Pag.206, 1.2]. A Ciência contribui em maior medida, mas numa escala de tempo superior.

A existência de interacções entre Ciência e Tecnologia permitiu o enriquecimento mútuo, mas enquanto o desenvolvimento tecnológico moderno se tornou impensável sem a ciência moderna, o contrário é menos verdadeiro: “a Ciência é em larga medida autónoma” [Cap.9, 1.3].

Ciência e Projecto

Tal como acontece com o progresso tecnológico e industrial, “o crescimento da Ciência é um traço característico da Europa”. O seu desenvolvimento simultâneo levanta o problema de saber “se a indústria é um produto do desenvolvimento da Ciência, ou se é a Ciência que é um produto da industrialização”. Provavelmente ambas as interações existiram e existem, mas, segundo Karl Popper, tanto o desenvolvimento industrial como o científico, que ocorreram desde o Renascimento, são concretizações da “ideia do domínio do homem sobre a natureza”, teoria com origem filosófica e religiosa, oriunda da filosofia europeia [Cap.9, 1.3].

Esta atitude e suas concretizações geraram o optimismo epistemológico, segundo o qual a Ciência permite atingir o verdadeiro conhecimento.

A industrialização e a ciência, aspectos característicos e fundamentais da civilização europeia, constituem um produto do “optimismo epistemológico”.

1.2.2 Inovação e Ciência

Os processos de obtenção de ideias, ou inovação, são de extrema importância para conceber um novo produto. Estas ideias surgem de modo diverso em diferentes equipas de projecto, pelo que as soluções que cada equipa obtém para o mesmo problema são distintas. As ideias obtidas são avaliadas pelas equipas e escolhidas as que se julgam melhores, para prosseguir em direcção ao objectivo do projecto. Na avaliação das ideias há, no entanto, uma elevada carga subjectiva.

O objectivo da AP é a avaliação das ideias geradas e o enquadramento das suas consequências. Ou de outro modo, a aplicação da AP neste trabalho, permite avaliar as ideias existentes sobre sistemas, permitindo excluir-se assim quaisquer processos psicológicos de avaliação.

Note-se que o processo de concepção de um novo produto é sistemático e metódico, mas também intuitivo e desregrado, evoluindo ao mesmo tempo por processos ordenados, heurísticos e de inovação [Cap.1.4, 1.4]. As estruturas mentais de inovação, e em especial a inovação em Engenharia, são diferentes das estruturas formais das Ciências Naturais e da Matemática. Adaptando o texto original [1.5], a Ciência procura uma lei geral, actua promovendo a constante actualização, tem um impacto económico indirecto numa escala de tempo indeterminada, para o que se promove a partilha e divulgação da informação. Já na indústria, é mais necessária a Inovação que a Ciência. Visa-se as ideias novas que resultem, que sejam correctas à primeira vez, das quais se possa extrair um proveito económico directo num tempo de execução e de rentabilidade determinado, evita-se que a concorrência lhes tenha acesso.

As duas formas não estão, no entanto, em conflito. A estruturação pode e deve ser usada para apoiar os processos intuitivos e criativos [Pag.15, 1.4]. Uma ideia obtida de forma intuitiva deve ser examinada de modo lógico, sistemático e analítico, verificando-se a

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

possibilidade de funcionamento da solução. A confusão entre Ciência e inovação ocorre mais pela capacidade intelectual do cientista em integrar processos de inovação, que de qualquer relação epistemológica entre ambas. Em Engenharia, a intuição tem uma componente de aplicabilidade, de possibilidade de realização e, como tal, de possibilidade económica.

A descoberta, a intuição e a inovação, são mecanismos fundamentais ao projecto, mas o seu estudo pertence ao âmbito da Psicologia ou da Neurociência. É necessário distinguir entre a concepção de uma ideia nova e os métodos e resultados da avaliação dessa ideia de forma lógica. [Pag.32, 1.6]. “Não há caminho lógico que leve a essas leis”, ou ideias. “Elas só podem ser alcançadas por intuição, alicerçadas em algo assim como um amor intelectual (Einfühlung) pelos objectos de experiência”, disse Einstein. Também Karl Popper (1959) diz: “não existe método lógico de conceber ideias novas ou de reconstruir logicamente esse processo” e “a questão de como ocorre ao homem uma nova ideia – quer seja um tema musical, um conflito dramático, ou uma teoria científica – pode revestir-se de grande interesse para a psicologia empírica, no entanto é irrelevante para a análise lógica do conhecimento científico.”

Ou ainda, segundo António Damásio [1.7]: “ A função da intuição no processo geral de tomada de decisões pode esclarecer-se com um texto do matemático Henri Poincaré, cuja visão acerca deste assunto se adapta perfeitamente ao quadro geral que tenho em mente”. E transcreve de seguida o texto onde Poincaré descreve a criação de ideias, não como combinações estéreis de possibilidades, mas como algo gerado da escolha dos “factos matemáticos dignos de serem estudados (...) que, pela sua analogia com outros factos, são capazes de nos levar ao conhecimento de uma lei matemática, tal como os factos experimentados nos levam ao conhecimento de uma lei física”. Acrescenta ainda que “as combinações estéreis nem sequer se apresentam à mente do inventor. Nunca surgem no campo da sua consciência combinações que não sejam úteis, excepto algumas que ele rejeita mas que, de certo modo, possuem algumas características das combinações úteis”.

A intuição é explicada por António Damásio como um processo de marcadores somáticos, que permite que nos dirijamos para o resultado de forma rápida, sem necessidade de testar todas as possibilidades combinatórias. Talvez no futuro a criação de ideias possa ser explicada cientificamente.

1.2.3 Filosofia da Ciência

Resulta dos parágrafos anteriores, que, se se pretende aplicar a AP como teoria de Projecto a sistemas com comportamento físico, excluindo-se da Engenharia os fenómenos não científicos, é necessário avaliar em que medida essa teoria pode ser considerada científica, e *a priori* definir o que é Ciência. A existência de diversos métodos e metodologias de Projecto, de opiniões dissonantes sobre teorias, ou sobre sistemas, impõe

Ciência e Projecto

a necessidade de recurso à Filosofia da Ciência para caracterizar a Ciência de Projecto. Esta Ciência, que ainda se encontra numa fase de afirmação e apresenta-se como um novo campo de pesquisa. “A proliferação de articulações concorrentes, a disposição de tentar qualquer coisa, a expressão de descontentamento explícito, o recurso à filosofia e o debate sobre os fundamentos são sintomas da transição da pesquisa normal para a pesquisa extraordinária” [Pag.123, 1.2].

Nesta linha, faz-se de seguida uma breve resenha da evolução do conceito de Ciência, baseada na opinião de alguns filósofos que tiveram maior influência na sua definição, a saber: Auguste Comte, Karl Popper, Thomas Khun e Michel Foucault.

Comte propõe o Positivismo como uma Filosofia que englobe a Filosofia Natural, originada nos trabalhos de Bacon e de Newton, mas também os fenómenos sociais. Esta Filosofia era apresentada como “uma maneira uniforme de raciocinar, aplicável a todos os objectos sobre os quais o espírito humano pode exercer” [Pag.LII, 1.8]. O positivismo tem origem na “Ciência Nova” do século XVII, que “conseguiu finalmente rejeitar as explicações aristotélicas e escolásticas expressas em termos das essências dos corpos materiais” [Pag.138, 1.2]. É essa novidade que caracteriza o novo espírito científico: “(...) o carácter fundamental da filosofia positiva é a de olhar todos os fenómenos como sujeitos a leis naturais invariáveis, das quais a sua descoberta precisa e a redução ao menor número possível são o princípio de todos os esforços, considerando como absolutamente inacessível e vazio de interesse, para a nossa investigação, o que se designa por causas, sejam primeiras ou finais” [Pag.26 e 27, 1.8]. A descoberta das causas primeiras é substituída pela descoberta das articulações das leis universais que regem a Natureza. Estas leis, designadas então por dogmas, enunciam o funcionamento da Natureza, sem no entanto tentarem explicar as suas causas. As causas foram consideradas pelo Positivismo como sendo metafísicas. Comte indica a linha a seguir pela Ciência: “A tendência constante do espírito humano, relativamente à exposição dos conhecimentos, é portanto a de substituir progressivamente a ordem histórica pela ordem dogmática, a única que pode convir ao estado de perfeição da nossa inteligência” [Pag.125, 1.8].

O Positivismo ainda é a linha filosófica com maior aceitação nas Ciências Naturais, “que pela utilização bem combinada da razão e da observação” permite alcançar “as suas leis efectivas, quer dizer as suas relações invariáveis de sucessão e de semelhança” [Pag.8, 1.8].

Mais tarde, surgem resistências à aceitação de princípios dogmáticos na Ciência. A eliminação dos dogmas traz dificuldades à síntese de resultados de experiências em leis naturais. Não admitindo o dogmatismo, ou se acredita que a concordância com a experiência é obtida pelo imediato “sentimento de convicção” que nos é transmitido,

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

designado por psicologismo, ou que a concordância provém da realização exaustiva de todos os testes possíveis sobre uma lei. Esta última hipótese leva necessariamente a um número infinito de testes, designada por “regressão infinita”. [Cap.5, 1.6].

A resolução deste trilema, designado por trilema de Fries (dogmatismo, psicologismo ou regressão infinita) é proposta por Karl Popper, doutorado em Filosofia com formação anterior em Matemática e Física. Popper distingue entre enunciados universais, ou leis universais, e enunciados particulares aplicados a uma certa experiência. O método aplicado na obtenção das leis da Natureza, ou método empírico, “caracteriza-se tão-somente por: a convenção ou decisão não determina, de maneira imediata, a nossa aceitação de enunciados universais, mas, pelo contrário, influi na nossa aceitação de enunciados singulares, ou seja, de enunciados básicos” [Pag.116, 1.6]. E, “sustento que, em última instância, decide-se do destino de uma teoria pelo resultado de uma prova, isto é, pela concordância acerca de enunciados básicos” [Pag.117, 1.6].

Ou seja, se existir uma teoria, a que corresponde um enunciado universal, t_L , e uma proposição de uma experiência, p_L , designado por enunciado básico, o método assenta na eliminação da teoria se não for confirmada a proposição, e não na aceitação imediata da teoria por confirmação da proposição. O método científico deverá assentar no *modus tollens*, ou seja se $((t_L \rightarrow p_L) \wedge \sim p_L) \rightarrow \sim t_L$, e não na indução (se p e depois t_L , $p_L \rightarrow t_L$). Ou, dito de outro modo, “o teste positivo ou bem-sucedido de uma hipótese nunca pode ser definitivo. Por mais confirmada (corroborada) que a hipótese possa ser, é sempre possível que venha a ser deposta no futuro” [Pag.33, 1.9]. As leis universais são, assim, válidas até que surja uma experiência que as deponha. O método científico, descrito desta forma, assenta apenas na lógica, sem necessidade de considerar a “imutabilidade e invariância no espaço e no tempo das leis naturais”, princípio que sendo aceite por Popper, era considerado pelo próprio de natureza metafísica.

Se apenas as proposições associadas a experiências podem ser confirmadas ou refutadas, um conjunto de leis universais que constitua “um sistema axiomático, não pode ser visto como um sistema de hipóteses empíricas ou científicas, porque não pode ser refutado por falsificação das suas consequências” [Pag.77, 1.6]. Só as proposições básicas de nível empírico mais baixo podem ser falseadas e, com elas, falseada a teoria.

O critério de demarcação da Ciência é esta possibilidade de ser falseada. Só uma teoria com possibilidade de falseamento, por refutação de proposições básicas dela deduzidas, pode ser considerada científica. Assim, a escolha de teorias científicas e a definição da objectividade dos seus enunciados “reside na circunstância de poderem ser intersubjectivamente submetidos a testes”, ou seja, dependem da aceitação desses testes pela comunidade científica.

Ciência e Projecto

Neste sentido, Popper aproxima-se de Thomas Kuhn, físico de formação, que considera a comunidade científica como o veículo de escolha das linhas de investigação, da sua aceitação e do conhecimento do mundo: “A comunidade é um instrumento extremamente eficaz para maximizar o número e precisão dos problemas resolvidos por intermédio da mudança de paradigma” [Pag.213, 1.2]. A aceitação tácita da imutabilidade das leis físicas poderá porventura estar expressa na declaração: “não é apenas a comunidade científica que deve ser algo especial. O mundo do qual essa comunidade faz parte também possui características especiais” [Pag.218, 1.2].

Esta comunidade estuda geralmente problemas com base em teorias e técnicas conhecidas, a que Kuhn designou por Ciência normal, não sem que isso obrigue à resolução de difíceis “quebra-cabeças”. “Resolver um problema da pesquisa normal é alcançar o antecipado de uma nova maneira. Isso requer a solução de todo o tipo de complexos quebra-cabeças instrumentais, conceptuais e matemáticos” [Pag.59, 1.2].

Em algumas situações, a teoria falha! Nessas condições, surgem novas ideias, provenientes por vezes da desorientação. Algumas das ideias, quando devidamente articuladas, podem originar aquilo a que Kuhn designou por paradigmas, ou seja, realizações “suficientemente inauditas para atrair um grupo sólido de partidários das práticas de actividades científicas rivais” e, simultaneamente, permitir estar “suficientemente em aberto para deixar toda a espécie de problemas para que os novos núcleos de praticantes os (possam) resolver”. O paradigma, não é apenas uma ideia articulada ou uma teoria, é um conjunto constituído pelos valores, teorias, técnicas e instrumentação comuns à comunidade científica. A terminologia de paradigma foi também empregue por Kuhn, no sentido estrito de teoria.

O aparecimento de falhas num paradigma não implica a sua destituição imediata. A comunidade científica só a depõe por substituição de um novo paradigma: “Tendo atingido o estatuto de paradigma, uma teoria científica apenas é declarada inválida se estiver disponível uma alternativa que ocupe o seu lugar.” O novo paradigma deve explicar melhor os fenómenos, deve ser comparado com os factos anteriores e articulado com as teorias existentes, criando-se então uma nova teoria. Kuhn afirma: “a determinação do facto significativo, a harmonização dos factos com a teoria e articulação da teoria, esgotam, creio, a literatura da ciência normal, tanto teórica como empírica” [Pag.55, 1.2]. Este reordenamento da teoria faz com que o novo paradigma não seja apenas um incremento ao existente. “A sua assimilação requer a reconstrução da teoria precedente e a reavaliação dos factos anteriores”.

Um exemplo interessante desta assimilação ocorreu quando Dalton, nos estudos da atmosfera em que se empenhou como meteorologista, considerou que, nas reacções químicas, os átomos se poderiam combinar em proporções inteiras. As proporções,

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

anteriormente medidas, das reacções do carbono com o oxigénio deixaram de ser 72% do peso de oxigénio para 28% de carbono, para passarem a ser de duas partes do volume de oxigénio para uma parte de carbono.

O paradigma alterou a forma de ver as reacções. “Os próprios dados haviam mudado. Este é o último dos sentidos no qual desejamos dizer que, após uma revolução, os cientistas trabalham num mundo diferente” [Pag.174, 1.2].

Em resumo, Popper situa o observador no próprio cientista, que ao fazer um conjunto de trabalhos se apercebe da comprovação ou não comprovação destes trabalhos com a teoria, aceitando a existência de leis universais externas ao cientista; Kuhn coloca o observador como externo ao mundo científico, olhando a sua evolução, mas coloca as teorias como pertença da comunidade científica.

A evolução da Ciência, feita de paradigmas que sobrevivem e que se destronam, pode equiparar-se, na Ciência, à teoria de Darwin sobre a evolução das espécies. Piaget, biólogo de formação e pai do Construtivismo, afirmava que a “vida é, em essência, auto-regulação”, ou seja, face a uma nova situação o indivíduo assimila-a e acomoda-a, seguindo-se uma fase de reorganização das suas estruturas mentais. Neste sentido, a evolução ou epistemologia da Ciência é análoga à psicologia genética, ou Construtivismo.

Michel Foucault aplica as ideias construtivistas à evolução da ciência no contexto social de cada época. O conjunto de teorias de uma Ciência (episteme) está associado a um inconsciente colectivo, pelo que a alteração desse inconsciente colectivo provoca alterações na Ciência. Esta ideia de evolução é próxima do conceito de paradigma de Kuhn: “a descrição que Kuhn faz das revoluções científicas, esta espécie de niilismo bem pode ser a única forma honesta de rigor possível no século XX” (Michel Foucault). E diz, a episteme “é o conjunto de relações que podemos descobrir, para uma dada época, entre as ciências quando as analisamos ao nível das regularidades discursivas”. “Não tem por fim reconstituir o sistema de postulados a que obedecem todos os conhecimentos de uma época, mas percorrer um campo indefinido de relações” [Pag.244, 1.10].

Neste sentido, o Construtivismo permite o subjectivismo, ou seja, a Ciência é encarada função da época, das sociedades e de cada pessoa, cada uma com a sua cultura ou educação próprias: “como era possível que homens, no interior de uma mesma prática discursiva, falassem de objectos diferentes, tivessem opiniões opostas, fizessem escolhas contraditórias” [Pag.252, 1.10]. Ou, como finalização da opinião de Michel Foucault: “porque é bem sabido que, no campo teórico moderno, aquilo que se gosta de inventar não são sistemas demonstráveis, mas disciplinas cuja possibilidade se abre, cujo programa se desenha e cujo futuro e destino se confiam aos outros” [Pag.259, 1.10].

Ciência e Projecto

Desta breve resenha da evolução da atitude filosófica relativamente à Ciência nos dois últimos séculos, passámos da atitude dogmática para a relativista. Saltámos da possibilidade humana de alcançar o conhecimento, para a situação de admitir qualquer possibilidade de conhecimento dependente do contexto. Esta última atitude tem tido forte expressão nas novas Ciências Sociais.

A maioria dos autores integra a Ciência do Projecto nas Ciências Sociais.

Popper, crítico acérrimo do relativismo, coloca a contextualização como a “doutrina da impossibilidade de entendimento entre culturas, gerações, ou períodos históricos diferentes, inclusive na Ciência ou na Física.” Propõe em alternativa a atitude racional de discussão entre ideias diferentes, com vista à avaliação das suas consequências, considerando a possibilidade de avaliação do real: “Por outro lado, o método correcto da discussão crítica parte desta questão: quais são as consequências da nossa tese ou teoria? Serão elas todas aceitáveis para nós?”

1.2.4 Experiência e comprovação

Entenderemos neste texto, a possibilidade de alcançar a realidade, pelo menos a pequena parte que nos afecta e à qual temos acesso. Neste sentido, tomaremos a experiência positivista, conjunto de observação e teoria, como sendo a base do método científico de comprovação.

Desde os inícios do século XX, Einstein, Heisenberg, Bohr e Rutherford consideraram a construção racionalista e matemática como a base da experiência. Esta poderia, ser, mesmo, exclusivamente racional. Só depois das conclusões por via racional, as verificações empíricas foram sendo feitas. Einstein considerou que “a Ciência é um instrumento pelo qual os homens são capazes de obter conceitos verificados da realidade por formulações empíricas deduzidas sistematicamente.” A noção da realidade passa a ser definida por uma construção matemática e racionalista, feita pelo cientista, mas independente do mesmo. Esta independência, assente na Matemática e na Lógica, confere objectividade à Ciência [1.11].

Consideraremos pois, a experiência associada à observação e à racionalidade, na qual a comprovação física depende da verificação das leis da natureza, no que toca às funções deduzidas de teorias. Neste sentido, a repetibilidade da experiência, ou seja, a intersubjectividade da verificação, é realizada ao nível das funções que descrevem os fenómenos, e não ao nível da concretização física da experiência.

A experiência racional, como determinação das consequências de teorias, na forma de imaginação de situações ou em modelos matemáticos comprovados, tem a vantagem de permitir identificar situações, que dificilmente seriam localizadas em experiências físicas.

1.2.5 Características de uma Ciência e de uma Ciência Axiomática

Ao contrário do que por vezes foi afirmado pelos relativistas, a Ciência encerra em si um conjunto de valores e de crenças, que lhe atribuem características próprias. São estes valores os guias da Ciência, que a distinguem de outras formas de conhecimento.

O conjunto de valores epistémicos da Ciência, ou mais precisamente das teorias científicas, é apresentado por Michael Russe [Pag. 48 e 49, 1.9], como sendo:

- Exactidão preditiva: ou a capacidade da Ciência prever em novas situações;
- Coerência interna: ou a não contradição e concordância entre os elementos internos da teoria;
- Consistência externa: ou a não contradição com elementos estabelecidos noutras teorias e a eventual concordância com partes dessas teorias;
- Capacidade unificadora: ou o esclarecimento, numa única teoria, de vários dados experimentais que até aí eram supostamente dissociados;
- Fertilidade: ou a capacidade de abrir novos caminhos, novas linhas de investigação.

Refere ainda a possibilidade de a teoria ser simples ou elegante, como critério estético de escolha da teoria.

Eekels [1.12] define como valores da Ciência a capacidade de um ramo da mesma servir como instrumento de investigação, os valores antropológicos e sócio-éticos associados à Ciência e aqueles que são relativos ao processo de investigação. Para estes, define os seguintes componentes:

- Explanatório e preditivo: ou o componente de explicação da teoria em *modus ponens* e a possibilidade de previsão;
- Racional: ou correcção lógica das deduções da teoria, sem recurso a sofismas ou formas incorrectas de raciocínio;
- Objectividade e Verificabilidade²: ou a correcção possível no desenvolvimento do trabalho e a possibilidade de ser analisado por quem o deseje;
- Estética: ou a beleza da teoria, normalmente descrita como simplicidade.

Por facilidade de utilização, uma teoria pode ser axiomatizada numa fase avançada do seu desenvolvimento, permitindo assim novos desenvolvimentos. Popper considera que um sistema teórico axiomatizado satisfaz os seguintes requisitos [Pag. 75, 1.6]:

- Livre de contradição interna;
- Independente: ou a impossibilidade de um axioma poder ser deduzido de um outro da mesma teoria;

² “Science Democracy Component”, no original.

Ciência e Projecto

- Suficiente: ou permitindo a dedução de todos os enunciados;
- Necessário: ou sem pressupostos supérfluos.

Note-se que um sistema axiomático não pode ser visto como um sistema empírico verificável. Poder-se-á, no entanto, retirar conclusões desse sistema que possam ser submetidas a testes. Só assim se torna possível a verificação dos axiomas. Ou seja, o critério de demarcação da Ciência não pode ser aplicado directamente a um sistema axiomatizado.

A simplicidade é referida como uma das características de uma Ciência, que terá ao mesmo tempo um carácter estético e prático. Estará provavelmente na base das escolhas feitas por diversos cientistas, desde Galileu, quando utilizou o quadrado do tempo para descrever a proporcionalidade em relação ao espaço percorrido por um grave; ou a descrição de Darcy-Weisbach para a perda de carga numa conduta, que considerou ser proporcional ao quadrado da velocidade média do fluido; ou a escolha de Gay-Lussac de uma relação linear na lei dos gases perfeitos, para a variação do produto pressão volume com a temperatura.

Na fase inicial da descoberta, todos os autores preferiram usar expressões simples, mesmo tendo à sua disposição múltiplas outras expressões com expoentes na vizinhança dos usados, que corroborariam igualmente os dados experimentais. Por que preferiram usar ajustamentos para descrever um fenómeno e não interpolações dos pontos usados? A razão será meramente estética? Prender-se-á apenas com a facilidade de utilização? Por que razão os expoentes mais simples corroboram melhor os dados provenientes da natureza?

Para Popper, as teorias mais simples têm uma grande vantagem: “As proposições simples devem ser mais apreciadas do que as menos simples, porque elas nos dizem mais, porque encerram um conteúdo empírico maior e porque são susceptíveis a testes mais rigorosos” [Pag.155, 1.6].

Teorias simples, enunciados ou expressões simples, “tendem a ter mais informação”.

Ou lido de outra forma, os sistemas mais simples, desde que cumpram o pretendido tal como os menos simples, encerram em si mais informação, ou ... necessitam de menos informação para serem aplicados.

1.3 Ciência do Projecto

A existência de uma Ciência de Projecto é um facto revelado pela confirmação intersubjectiva dos investigadores, que acorrem em grande número aos vários congressos sobre Projecto e pelo número de artigos publicados. A primeira conferência sobre Projecto ocorreu em Londres em 1962, sob a designação de “Conference on Design Methods”. Há mais de 30 anos que existem as conferências do ICED (International Conference of Engineering Design) e mais recentemente, desde 2000, as do ICAD (International Conference on Axiomatic Design).

No entanto, é necessário saber que conceito de Projecto é utilizado na Ciência de Projecto e onde se enquadra esta Ciência.

1.3.1 A sistematização da Ciência de Projecto de Hubka e Eder

Hubka e Eder (1992) empreenderam uma das primeiras tentativas de sistematização da Ciência de Projecto [1.4]. Consideram englobados na Ciência todos os conhecimentos empregues em Projecto, originados em teorias ou fazendo parte dos pressupostos aceites numa determinada área. Adoptaram uma postura relativista, enquadrando na Ciência o conhecimento necessário a um fim. Segundo estes autores, os objectos da Ciência de Projecto são os sistemas técnicos utilizados em cada projecto e os processos para alcançar a solução de projecto. Nestes incluem-se a análise, a síntese, a indução, a dedução, a abstracção e a concretização, que fazem parte do método em Ciência. À indução e à síntese, que originam hipóteses, segue-se a verificação, pela utilização conjunta da dedução e da análise [Pag. 85, 1.4].

O objectivo da Ciência do Projecto é, então, obter diversas taxinomias e uma visão estruturada da informação, base para uma estrutura racional. Nesta estrutura devem estar os grupos de conhecimento, as suas características e as relações entre elementos internos e externos. Genericamente, deve ser um sistema de conhecimento, que deve permitir a investigação sobre si próprio e a previsão do seu comportamento [Cap.4, 1.4].

O Projecto é uma transformação de informação, onde alguns conceitos terão uma forte estrutura analítica, enquanto que outros poderão apenas ser simples alertas. Embora não se pretenda enumerar exaustivamente o conhecimento necessário a um projecto de Engenharia, este deverá conter o conhecimento básico das ciências aplicáveis (ciência de materiais, tecnologia de produção, etc.); o conhecimento da especialidade em causa, de funções, de modos de operação e de organização; o conhecimento dos componentes a incorporar no sistema; o conhecimento das possibilidades de produção e dos fornecedores;

Ciência e Projecto

o conhecimento dos processos, métodos e técnicas que possam facilitar o trabalho de projecto; o conhecimento das técnicas e modelos de representação das ideias; o conhecimento da organização, gestão e administração associadas ao projecto; o conhecimento de meios de trabalho, livros, catálogos, equipamentos informáticos e de desenho; e o conhecimento de normas, regulamentos e patentes [Pag. 72, 1.4].

A Ciência do Projecto deve assim ser entendida como um sistema de conhecimento logicamente inter-relacionado, que contém e organiza o conhecimento completo necessário a cada projecto. A Ciência necessita não só de descrições sistemáticas (conhecimento declarativo e descrições), mas também de uma metodologia, algoritmos e técnicas, instruções para uma actividade prática (conhecimento prescritivo).

A taxinomia supracitada para a Ciência do Projecto deve assentar no cruzamento entre as declarações metodológicas (descritivas e prescritivas) com as características dos objectos referidos: sistemas técnicos e processos de projecto.

No essencial, a estrutura do conhecimento conterá os quatro grandes campos:

- Descritivas sobre sistemas técnicos: Constitui a “Teoria dos Sistemas Técnicos”, que “descreve, explica, estabelece e consubstancia as estruturas, os seus elementos, propriedades, modos de acção, funções, etc., de um sistema técnico”;

- Prescritivas sobre sistemas técnicos: Conhecimento no sentido estrito. “Contém o saber relativo aos meios de satisfazer as funções de um sistema técnico idealizado, ou seja, o conhecimento sobre modos e meios segundo os quais os produtos técnicos podem e devem ser instalados (...)”. Estas declarações têm o seu fundamento nas Ciências puras, nas da Engenharia e nas heurísticas do conhecimento prático;

- Descritivas sobre o processo de Projecto: constitui a “Teoria do Processo de Projecto”, “descreve, explica, estabelece e consubstancia os elementos, propriedades, sequências e efeitos do Projecto realmente observado e possíveis processos de Projecto no seu contexto sócio-técnico (...)”;

- Prescritivas sobre o processo de Projecto: Conhecimento sobre o processo de Projecto, onde são de particular importância “as metodologias de Projecto que mostram modos (métodos, processos, estratégias, tácticas) para com sucesso projectarem e gerirem o processo num contexto industrial”. Pode conter todas as formas de concepção e invenção, de representação, cálculo ou análise.

O conhecimento sobre uma matéria deve conter uma visão geral das quatro taxinomias, particularizando, na medida do necessário e a níveis determinados, o conhecimento de cada região de uma taxinomia. Neste conhecimento é considerada a dicotomia entre a teoria, quer dos sistemas, quer do processo de projecto, e a prática, da criação de sistemas e das metodologias do processo de projecto.

Das taxinomias referidas, tem especial interesse a “Teoria dos Sistemas Técnicos”, por permitir a transformação da informação técnica em projecto [Cap.7.1, 1.4]. Um projecto finalizado é uma estrutura declarativa do propósito do sistema. Terá, ainda, um conjunto de outras estruturas progressivamente menos abstractas: a estrutura de processamento de materiais, de energia, de informação, etc; a estrutura funcional, com as relações entre as diversas capacidades de realização de tarefas; a estrutura dos órgãos do sistema, os quais realizam as funções descritas na fase anterior; e, finalmente, a estrutura dos componentes de cada um dos órgãos, que constitui o projecto detalhado do sistema pretendido.

Estes sistemas têm “propriedades” definidas em cada nível das estruturas referidas. Cada propriedade pode ser concretizada por diversas estruturas de órgãos do sistema. Este processo de relacionamento entre propriedades e órgãos é designado por mapeamento. Como resultado, “o mesmo comportamento (função e/ou estrutura de funções) pode ser idealizado por diversos órgãos ou estruturas de componentes”, e o seu recíproco é verdade: “todos os sistemas técnicos com idêntica estrutura possuem o mesmo tipo de elementos na estrutura mais abstracta (...).”

1.3.2 Geografia da Ciência de Projecto

Do referido anteriormente, a Ciência do Projecto contém características de Sistemas Técnicos integráveis nas Ciências Naturais, mas também modos de proceder no contexto do processo do projecto, relacionados com as Ciências Sociais.

Há que tomar consciência de que a divisão clássica entre Ciências Naturais e Ciências Sociais tem sido esbatida face à tentativa de prova das últimas e à relatividade das primeiras [1.13]. As novas Ciências Sociais (as Ciências da complexidade, as Ciências do artificial ou as Ciências do Projecto) têm sido fundadas sobre as teorias construtivistas, que pretendem criar novas epistemologias para o fundamento das Ciências, sem recurso aos processos da Filosofia Positivista. A epistemologia destas Ciências é baseada “na experiência de uma inteligência artificial, uma inteligência inventiva e criativa que é auto-organizável, onde a cognição e a computação são consideradas equivalentes”[1.13]. A divisão entre Ciências Naturais e Sociais pode ser descrita com base na localização do objecto da Ciência: nas Naturais, o objecto é externo ao observador, ou seja, existe uma objectividade ontológica; nas Sociais, o objecto é interno ao observador, pelo que existe subjectividade ontológica [1.11].

A Engenharia e o Projecto em Engenharia têm, neste sentido, subjectividade ontológica, dada a impossibilidade de dividir a concepção de quem concebe. São construções construtivistas, que aplicam o conhecimento das Ciências Naturais à formulação de soluções. Estas soluções são por natureza indeterminadas, não existindo uma única solução

Ciência e Projecto

para o mesmo conjunto de dados de um problema. O processo de construção de soluções depende da equipa de projecto, que se adapta às novas situações e que reorganiza a informação em novos modelos.

As Engenharias em geral e a Ciência de Projecto em Engenharia em particular têm características das Ciências Naturais e das Ciências Sociais.

A pergunta que permanece é a de saber qual o conceito epistémico necessário a este trabalho. Para isso é necessário definir ontologicamente o objecto da Ciência do Projecto: o próprio Projecto.

1.3.3 Conceito de Projecto

O termo projecto é utilizado em diversas acepções e nas mais diversas situações. Tem, no entanto, sempre como ideia-base a criação de algo novo.

Em Engenharia, o termo pode descrever uma idealização, ou uma ideia concretizada aos mais diversos níveis, ou a sua materialização num conjunto de textos e de plantas.

Em todos, o Projecto em Engenharia utiliza conceitos de grande rigor, relativos ao espaço a três dimensões, associados às Ciências Naturais, à Física, à Matemática e à Lógica, que diferenciam a concepção em Engenharia da concepção em outras actividades. Incorpora, sobretudo, um elevado conhecimento técnico, de mercado e legislativo, que associa à formalidade da Ciência a informalidade da inovação e da criação. O projecto é também visto como a aplicação de conjuntos de heurísticas, de aplicação iterativa, com o objectivo de alcançar equilíbrios entre situações antagónicas.

No projecto processa-se informação. Não se trata apenas da sua recolha ou análise; diferente da actividade de pesquisa ou investigação; diferente da actividade de cálculo ou de desenho. Todas estas actividades são actividades do processo de projecto.

Epistemologicamente, a actividade de Projecto e o processo de projectar são conceitos diferentes.

Na terminologia empregue neste trabalho, Projecto será a concepção de algo novo, de “não rotina”, de desenvolvimento, externa ao processo de projecto. A concepção envolve: a definição do problema; o processo criativo de hipóteses de soluções; o processo analítico com a finalidade de avaliar as hipóteses; a avaliação final da conformidade entre as necessidades e o projecto proposto [Pag.6, 1.20]. No conceito deste trabalho, Projecto será a actividade de projectar e não o processo de projectar. Nesta actividade, considerar-se-á apenas a avaliação de hipóteses de solução, ou de sistemas, e a conformidade do seu funcionamento com as necessidades previstas. Eliminamos, assim, a necessidade do psicologismo, da inovação, e em grande parte das teorias construtivistas. Fixamos o Projecto como experiência racional, baseada nos conceitos físicos, nas deduções desses conceitos e na avaliação física dos resultados, ou seja, utiliza-se um conceito objectivo de Projecto.

1.3.4 Experiência e repetibilidade

Segundo Eekels [1.14], a experiência na Ciência Natural e o Projecto são “gémeos siameses”. Diferencia-se de Popper ao considerar a possibilidade de comprovação de teorias e a utilização dos raciocínios de indução, de abdução e de inodução.

Na sua teoria relativa às semelhanças entre experiência e Projecto, considera a experiência e o Projecto definidos por proposições, podendo assim aplicar a lógica proposicional. Seja uma experiência física com um estado inicial, descrito por um conjunto de proposições r_i , e cujo estado final é descrito por r_f . Seja ainda q_e o conjunto de proposições da previsão da experiência. Note-se que tem de ser possível deduzir q_e a partir de r_i , ou seja, r_i contém o conjunto de premissas da teoria. Eekels afirma que a teoria é verificada se $|r_f - q_e| < \varepsilon$, com ε arbitrariamente pequeno dependente da realidade física. Se a r_i conjugarmos as proposições “exp” que descrevem a experiência, obteremos r_f , ou de outro modo $r_i \wedge \text{exp} \rightarrow r_f$, ou se a teoria for verificada:

$$r_i \wedge \text{exp} \rightarrow q_e \quad (1.1)$$

Segundo Eekels “a ‘exp’ é dada e q_e tem de ser obtido com a ajuda da teoria”, sendo este o processo de “conhecer”.

No Projecto, as proposições a obter são as do “projecto proposto”, q_p . No “reino da mente” conjuga-se as proposições iniciais r_i com as do projecto, “proj”, para obter as proposições finais r_f : $r_i \wedge \text{proj} \rightarrow r_f$. Em r_i estarão todas as proposições relativas ao estado inicial, as condições e as funções a desempenhar pelo sistema. O resultado r_f terá o conjunto de proposições declarativas das funções tais como o sistema as desempenhará, que poderão verificar q_p . Pode afirmar-se:

$$r_i \wedge \text{proj} \rightarrow q_p \quad (1.2)$$

Nesta situação, “ q_p é dado e ‘proj’ tem de ser obtido”, correspondendo ao processo de “fazer”.

Pelo indicado, “ambas, a inferência q_e e o projecto ‘proj’, são formas de criatividade”, os resultados a serem obtidos. Os processos de “conhecer” e de “fazer” são próximos. A diferença reside que nos processos de “conhecer” pretende-se o resultado da implicação e nos de “fazer”, o implicando.

Eekels segue, neste sentido, a teoria positiva para a realização da experiência e a construtivista para a realização do Projecto.

Ciência e Projecto

Considere-se agora o conceito de Projecto tal como definido no parágrafo 1.3.3.

Em primeiro lugar, note-se que a experiência física não é um dado do problema. O resultado da teoria q_e é tomado como hipótese, sendo conhecida a realidade r_i , pelo que a experiência “exp” pode ter o mesmo significado de um projecto, um projecto para uma experiência. A verificação de uma teoria, ou a corroboração de experiências com uma teoria, pode ser feita por experiências com formatos diversos, desde que os seus resultados estejam de acordo com os resultados da previsão das funções físicas que descrevem o fenómeno. Ou seja, a intersubjectividade de corroboração pela experiência não ocorre no nível físico, mas no nível das funções.

Por outro lado, se excluirmos o modo de obter um projecto e nos centrarmos na existência de uma idealização de um projecto, então “proj” é dado e pretende conhecer-se a diferença entre r_i e q_p . Neste caso, as equações (1.1) e (1.2) são iguais e a realização da experiência de projecto reside em conseguir um modelo físico que desempenhe determinadas funções. Projectos diferentes que desempenhem as mesmas funções terão repetibilidade, do mesmo modo que existe repetibilidade nas experiências da Física.

Chamaremos à repetibilidade baseada na verificação das funções, repetibilidade funcional.

Então, se q_e não se verificar, admitindo que “exp” foi bem conduzida, ou r_i está incorrecto ou o processo de dedução teve erros:

$$\sim q_e \rightarrow \sim (r_i \wedge \text{exp}) \quad (1.3)$$

Se q_p não se verificar, ou as funções iniciais não são possíveis, ou o projecto está incorrecto:

$$\sim q_p \rightarrow \sim (r_i \wedge \text{proj}) \quad (1.4)$$

A repetibilidade funcional de um projecto é equivalente à repetibilidade funcional de uma experiência, se o projecto contiver apenas funções físicas. Ou, mais genericamente, se as funções do projecto forem descritas por proposições que possam ser falseadas. Nos restantes casos não é possível falsear as proposições e estaremos fora do âmbito da Ciência.

No entanto, há uma diferença ontológica entre o Projecto e a Ciência Natural. Nesta, a experiência é dada e comprova-se as leis da Natureza; no Projecto, as leis da Natureza são assumidas e pretende obter-se o projecto idealizado.

1.3.5 Solução adoptada

Neste capítulo refere-se os diversos métodos que abarcam o processo de projecto, que enquadram o processo criativo ou que utilizam métodos facilitadores do aparecimento de novas ideias. Não é de esquecer num projecto o enquadramento legislativo, as questões estéticas, as razões éticas e outros conhecimentos que permitem colocar um projecto de acordo com a cultura onde é utilizado. Todos estes conhecimentos são valiosos e marcam a diferença de um produto projectado, mas devemos ter consciência de que são externos à Ciência Natural.

Utilizaremos para critério de demarcação da Ciência, o critério de falseamento. Neste sentido, é nosso objectivo analisar que soluções de projecto devem ser utilizadas, tomando para objecto da análise as soluções de projecto existentes, ou soluções propostas, sem preocupações sobre o modo do seu aparecimento, ou sobre o processo da sua materialização.

Consideraremos como processo epistemológico a racionalidade, baseada na Física, e a avaliação com base na experiência racional. A objectividade das conclusões será dada pela corroboração das consequências da teoria com os resultados de modelos físicos.

Claro que a articulação da teoria não é totalmente isenta de subjectividade, mas tentaremos manuseá-la com base em normas e códigos que lhe emprestem objectividade, ou pelo menos intersubjectividade.

Analisaremos o critério de repetibilidade funcional, como base para a avaliação entre diferentes concepções físicas. Um projecto funcionalmente igual a outro cumprirá estritamente as mesmas funções. Caso existam diversas soluções para o mesmo projecto, deverão ser escolhidas aquelas que melhor cumprem essas funções.

Avaliaremos o conceito de enunciados universais para descrever a teoria enquadradora, e singulares para as suas concretizações particulares, considerando a impossibilidade de comprovação dos enunciados universais, mas a possibilidade de comprovação dos enunciados singulares. Assim, não há, em Ciência, dicotomia entre teoria e prática. A prática em geral, e as aplicações da Ciência de Projecto em particular, são consequências de teorias, não corpos de conhecimento autónomos. A relação entre teoria e prática é ainda maior que o exposto, pois se os enunciados universais só podem ser verificados pela comprovação dos enunciados singulares, então a apresentação de uma teoria não é dissociável da apresentação de conclusões práticas sobre algum domínio.

Note-se que este modelo não é a estrita negação da teoria de Hubka nem da teoria construtivista, e que o processo seguido não necessita das hipóteses de qualquer uma.

Parte-se da hipótese que há conhecimento valioso que não é científico. O Projecto utiliza conhecimento não científico que pode ser demarcado do conhecimento científico.

1.4 Teorias de Projecto

A Ciência do Projecto em Engenharia pode ser estratificada nos seguintes níveis, do de maior aplicação para o mais abstracto [1.12]: prática de projecto de Engenharia; métodos e metodologias de Projecto; Ciência de Projecto em Engenharia; Epistemologia do Projecto em Engenharia; Epistemologia geral.

Nos parágrafos seguintes serão apresentados diferentes métodos e metodologias aplicados em Projecto. Uma metodologia é, estritamente, a Ciência que estuda os métodos. No entanto, uma vez que é difícil fazer a distinção entre a metodologia e os seus resultados e não havendo vantagens para este trabalho no esclarecimento dessa divisão, considerámos o conjunto como metodologias³. Será brevemente apresentado o TRIZ, as teorias de Projecto total de Pugh, o Projecto em Engenharia de Pahl, as metodologias de Análise do Valor e QFD, os métodos Taguchi e as matrizes DSM. Finalmente, apresenta-se a Teoria Axiomática de Projecto.

Deste conjunto de teorias parece sobressair a situação de crise, que Kuhn refere como propiciadora do surgimento de novos paradigmas.

1.4.1 Metodologias

Neste parágrafo iremos debruçar-nos sobre os métodos e metodologias que não consideram as funções como elemento chave de Projecto. Descreve-se de seguida a teoria inventiva TRIZ, a teoria do Projecto total de Pugh, o Projecto robusto de Taguchi e a matriz de Projecto DSM.

No contexto da Teoria Axiomática de Projecto, estas metodologias e métodos são algorítmicos, dado que recorrem a metodologias que guiam o utilizador passo a passo na realização do projecto. São exemplos os métodos de DFM (Design for Manufacturability), de DFA (Design for Assembly) ou, devido à profusão de outros métodos, o DFx. Neste acrónimo genérico, o “x” significa um qualquer propósito do projecto. Convém não desconsiderar estes métodos, pois constituem conhecimento adquirido comprovado. Têm, no entanto, a sua aplicação limitada a situações que possam ser enquadradas em estereótipos pré-definidos.

TRIZ é o acrónimo Russo para “Teoriya Reshniya Izobretatelskikg Zadatch”, ou teoria da resolução inventiva de problemas, criada por Altshuller a partir da análise a cerca de 40.000

³ Eekels designa este conjunto por “methodics”.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

patentes, apresentadas sobretudo na URSS, nos Estados Unidos da América e na Alemanha. Altshuller extraiu delas 40 princípios inventivos para situações de conflito, entre outros tantos parâmetros de Engenharia, agrupados em classes.

O TRIZ fornece um algoritmo de procura de solução para cada tipo de problema formulado, baseado na hipótese que “a maior parte das soluções inovativas para problemas tecnológicos podem ser obtidas de analogias com certos padrões ou princípios derivados de casos de invenções anteriores.” Considera que as situações de conflito em Projecto podem ocorrer num sistema técnico ou num processo técnico. Um sistema técnico é um conjunto de peças com ligações no espaço; o processo técnico é um conjunto de peças com ligação no tempo.

Ontologicamente, as contradições que ocorrem nos sistemas são classificadas em contradições administrativas, técnicas e físicas, das quais consideraremos as duas últimas. Uma contradição técnica ocorre num conflito entre dois subsistemas; uma contradição física acontece quando a variação de uma propriedade de um sistema realiza ao mesmo tempo uma função útil e uma função indesejada.

Para cada par de contradições técnicas entre parâmetros, existe um ou mais princípios inventivos propostos por Altshuller. Os parâmetros de Engenharia podem ser agrupados em parâmetros físicos (p.e. volume, massa, força), em parâmetros técnicos independentes negativos (p.e. duração, energia gasta, perda de tempo) e em parâmetros técnicos independentes positivos (p.e. estabilidade do sistema, manufacturabilidade).

Os princípios inventivos referidos têm, na maior parte das situações, vários modos de interpretação, servindo como guias da imaginação. Estes princípios visam a eliminação de cada contradição técnica, ou seja, tentam melhorar uma característica de um subsistema sem que a de um outro seja piorada [Cap.13, 1.15].

Por vezes, podem ser operadas alterações de contradições técnicas em contradições físicas. Existe contradição física quando se deseja que um parâmetro físico aumente para melhor cumprir um determinado resultado, mas ao mesmo tempo pretende-se que seja reduzido devido a outro resultado que deve ser igualmente cumprido. As contradições físicas podem ainda ser geométricas ou funcionais [Cap 14, 1.15].

Um exemplo de contradição física, muitas vezes referida no ar condicionado, é a necessidade de usar nos edifícios elevados caudais de ar exterior para melhoria da salubridade, mas que, por outro lado, fazem aumentar a factura de energia. Este exemplo integra-se na contradição do TRIZ designada por matério-energética.

A teoria de Pugh sobre Projecto total [1.16] é uma metodologia de lançamento de produtos desde a fase de identificação de necessidades no mercado até à fase de vendas. Consiste num processo que integra diversos métodos, com a finalidade de obter um produto com sucesso nas vendas e de acordo com os requisitos dos clientes. “Sucesso no mercado

Ciência e Projecto

requer rigor no projecto total e rigor na Engenharia ao mais alto nível – nunca um sem o outro”. Garantir o rigor no desenvolvimento de engenharia não é suficiente por si só. “Excelência técnica não é suficiente sem competitividade comercial.”

Qualquer projecto apresenta sempre um núcleo de actividades com as fases de identificação das necessidades do utilizador, definição das especificações de projecto do produto, projecto conceptual, projecto de detalhe, produção e venda. “Todos os projectos começam, ou deviam começar, com uma necessidade que, quando satisfeita, se insira num mercado existente ou crie um mercado por si só”. Apenas depois de estarem definidas as necessidades do cliente devem ser feitas as especificações do projecto do produto. Muito embora as diversas actividades do núcleo do projecto apareçam representadas de modo sequencial, em todos os estádios do projecto as diversas actividades no núcleo do projecto podem ser iteradas.

O processo de formulação da especificação do produto deve iniciar-se pela pesquisa de informação contendo a legislação aplicável, patentes e direitos de autor, relatórios, publicações de órgãos oficiais e dados estatísticos de mercado. Devem ser identificadas tendências de mercado e obtidas opiniões de órgãos oficiais. Deve ainda ser obtida informação sobre produtos e marcas da concorrência. Com a informação recolhida deverá ser efectuada uma avaliação paramétrica das especificações do produto e uma comparação do produto proposto com os da concorrência.

No final, a especificação de projecto de produto deve definir as características fundamentais do produto, avaliar condições de funcionamento e impacto sobre o ambiente, sopesar tempos de operação e de vida do produto, e ter em conta questões como manutenção, custo objectivo, concorrência, modo de transporte, embalagens e tempos de armazenagem, quantidades produzidas, dimensões, pesos, estética e materiais, tipo de indústria a instalar e processos, especificações, normas aplicáveis patentes e legislação, ergonomia, estimativa de fiabilidade, testes a efectuar, segurança, constrangimentos da empresa e do mercado, implicações políticas e sociais, documentação e recuperação no final da vida do produto [Cap.3, 1.16].

Após a especificação, devem ser geradas soluções que cumpram as necessidades definidas, constituindo esta a fase de Projecto conceptual. O Projecto conceptual pode ser definido como a representação de todos os subsistemas que compõem o sistema. Tem essencialmente duas fases que se articulam iterativamente: a geração de soluções que cumpram as necessidades e a sua avaliação de acordo com critérios previamente definidos, de modo a escolher qual a que melhor respeita a especificação do produto.

As técnicas de sucesso mais utilizadas para a geração de ideias, no contexto de uma convergência controlada, são a analogia, o *brainstorming*, a listagem de atributos, as *checklist*, processos matriciais de combinação e de inversão. [Cap.4, 1.16].

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Segue-se a fase de projecto de detalhe, que se preocupa sobretudo com o projecto de subsistemas e de componentes. Deve atingir o nível da especificação dos componentes dos subsistemas utilizando uma metodologia análoga às descritas para a realização do Projecto conceptual. Nesta fase, é possível definir o custo baseado em parâmetros conhecidos do grupo de projecto, obtidos a partir de tipificações de custos anteriores e de indicadores de custos globais de projectos similares. Podem ainda ser obtidos os custos de cada componente, nomeadamente pela utilização de factores de forma ou de complexidade dos componentes.

A fase de projecto para fabrico tem sido, muitas vezes, separada da fase de projecto conceptual ou de detalhe. O envolvimento dos engenheiros de processo na concepção do produto criou uma nova corrente de Projecto, designada por “Engenharia simultânea” ou “Engenharia concorrente”.

A fase final de Projecto é o projecto para fabrico, determinado pelo projecto para produção e pelo projecto para montagem.

Finalmente, temos a fase de vendas, arquitectada desde a primeira fase do Projecto: o marketing. O marketing terá estabelecido a natureza e características do produto contextualizando as necessidades do utilizador. As vendas deverão caracterizar o modo de distribuição, o serviço pós-venda e outras actividades da actividade de vendas. A política de vendas deve considerar o tamanho das peças a produzir, seu número e veículo de vendas.

A aplicação do conceito de Projecto total pode empregar diversas técnicas e métodos, alguns dos quais serão descritos no contexto deste trabalho, nomeadamente o método de Taguchi.

Na década de 1950, Taguchi iniciou estudos de um método que melhorasse a qualidade dos produtos, na Electrical Communications Laboratory, no Japão. Este método foi intensivamente aplicado pela Toyota. O método tomou o nome do seu autor após a introdução nos Estados Unidos na década de 80. Taguchi considerava uma divisão em cinco fases no Projecto de produtos ou de processos: selecção do sistema; projecto de parâmetros; projecto de tolerâncias; especificação de tolerâncias; e gestão da qualidade para o processo de produção.

O seu método aborda a qualidade, vista sobretudo de acordo com o afastamento aos valores definidos em projecto e as tolerâncias. Estas podem implicar perdas, pelo que definiu a qualidade do produto com base na avaliação das perdas. As perdas são “definidas como a quantidade de variação funcional de produtos mais todos os efeitos negativos, tais como estragos ao ambiente e custos operacionais” [Cap 1, 1.17]. A função de perdas L_p , que deverá ser mínima no valor objectivo m_0 , é dada por:

$$L_p(y) = k_p (y - m_0)^2 \quad (1.5)$$

Se o custo de uma não conformidade for C_t , quando ocorrer um desvio Δ do valor objectivo, então $k_p = \frac{C_t}{\Delta^2}$ e a função (1.5) toma a forma $L_p(y) = \frac{C_t}{\Delta^2}(y - m_o)^2$. Esta expressão é aplicada “na situação nominal, melhor”, existindo outras funções de perdas para “quanto menor, melhor” e “quanto maior, melhor”. A tolerância toma neste método um papel fundamental na definição das perdas. Na realidade, em Engenharia, é tão importante conhecer os valores nominais dos parâmetros como conhecer os valores possíveis para as suas variações. Por vezes, essas variações são devidas a efeitos não controláveis, designados por ruído. O método de Taguchi pretende escolher os parâmetros que minimizem as relações entre o sinal, ou valor objectivo, e o ruído. Para o efeito, considera uma bateria de testes de valores nominais cruzada com as hipóteses de ruído em parâmetros do sistema. As combinações de testes e de ruído são obtidas a partir de vectores ortogonais combinados em matrizes, para diversas possibilidades de número de factores e de níveis desses factores.

A matriz DSM (Design Structure Matrix) representa as relações entre pares de elementos, sejam eles componentes de um sistema, grupos de pessoas, actividades ou parâmetros. Foi proposta por Steward para a General Electric em 1967, mas só publicado pelo autor em 1981. É uma matriz quadrada, representativa de um dígrafo (grafo orientado), designada por matriz de adjacência nó-nó, em que em cada nó do grafo se encontra um elemento do sistema.

Um elemento significativo, X, na matriz indica um fluxo de um elemento para outro. Este fluxo pode ser de energia, de informação, de massa, ou relativo à interacção espacial entre elementos. Numa linha da matriz identificam-se todas as entradas necessárias ao funcionamento do elemento dessa linha. De forma semelhante, lendo uma coluna, os elementos abaixo da diagonal principal representam a informação deste elemento para elementos a jusante no processo. Elementos significativos acima da diagonal representam informação recebida por retroacção. Se a matriz for diagonal, não existem interacções entre os componentes e a configuração é em paralelo; se for triangular inferior, a informação de um elemento tem de passar para os colocados a jusante e a configuração do sistema é sequencial; se a matriz tem elementos abaixo e acima da diagonal, então existem retroacções entre os componentes e a configuração é acoplada. Se a matriz for em banda, as retroacções são limitadas aos elementos mais próximos.

O DSM permite identificar os elementos que interagem por retroacção, que passam a constituir um *cluster*, que pode ser materializado por um conjunto de componentes.

Na avaliação DSM são utilizadas diversas técnicas de reordenação da matriz DSM e, utilizando a teoria de grafos, identificados os clusters e tipos de projecto em causa.

1.4.2 Funções

O conceito de função foi primeiro introduzido pelo economista Adam Smith, que propôs que conjuntos de pessoas específicas realizariam funções diferentes na sociedade.

Mais recentemente, este conceito foi utilizado no Projecto por Lawrence D. Miles, com a teoria da “Análise do Valor” [Cap. 3, 1.18]. Miles, na altura responsável pelas compras da General Electric, propôs esta ideia em 1947, nos E.U.A. A falta de componentes e de matérias-primas, que se fazia sentir na época, obrigava à procura de alternativas.

D. Miles procurou-as pensando nas necessidades que deveriam ser satisfeitas e não nos componentes em si. O facto de encontrar, frequentemente, soluções melhores do que as originais levou à aplicação sistemática do método. Surgiu assim a “Análise do Valor” como método de melhoria de soluções.

Neste contexto, o conceito de função é designado como o propósito final do efeito de um produto ou de um dos seus constituintes, normalmente verbalizado com um ou mais substantivos [1.18].

Hubka e Eder (1982) [Cap.7, 1.4] consideraram as funções de um sistema técnico como o comportamento do sistema de modo generalizado. Salientaram a relação entre o domínio dos elementos, onde se incluem as funções, e o domínio das estruturas, que contêm os órgãos. O conceito de função de Pahl e Beitz (1984) [1.19] é a relação entre entrada e saída de um sistema, no que diz respeito a materiais, energia e sinais. A função global para um problema global é estabelecida na fase de Projecto conceptual [Cap. 6, 1.19], sendo desejável a sua divisão em sub-funções para facilitar a procura de soluções. O conjunto de funções e sub-funções é designado por estrutura funcional, sendo o objectivo de uma das fases do Projecto conceptual.

Estes conceitos são equivalentes a responder à seguinte pergunta: “O que se pretende alcançar?”. A noção de função para Suh é a de formular as respostas a esta pergunta, ou seja, identificar as exigências para essas funções, num domínio não físico (1990) [1.20]. Estas exigências, designadas por requisitos funcionais (RF), são localizadas num espaço não físico, num espaço dito funcional.

“Como se pretende alcançar?” concretiza-se fisicamente em sistemas ou componentes que se designa por parâmetros de projecto (PP).

Projectar é responder alternadamente às perguntas anteriores: “o que se pretende alcançar?” e “como se pretende alcançar?”

1.4.3 Metodologias baseadas em funções

Nesta secção, descreve-se as metodologias baseadas em funções, a “Análise do Valor”, o QFD, Quality Function Deployment, e a estruturação de Projecto em Engenharia de Pahl e Beitz.

A “Análise do Valor” (AV) é uma metodologia de Projecto que define um critério de escolha de soluções. Para um projecto de um produto são definidas as funções que este deve cumprir, ponderadas a partir da sua importância relativa. A partir da ponderação e do modo como cada hipótese de solução cumpre essas funções define-se a funcionalidade da solução. A relação entre a funcionalidade e o custo das soluções é designada por “valor” da solução. Quanto mais valor tiver uma solução, melhor cumpre as funções pretendidas e/ou menor custo tem. As funções devem ser rigorosamente definidas, indicando-se as gamas ou mínimos para o funcionamento do projecto. A ordenação e ponderação de funções podem ser efectuadas recorrendo às matrizes de Satty.

Ao serem entrecruzadas com os componentes físicos, as funções podem ser associadas aos custos, permitindo determinar-se os custos funcionais [1.21].

Em AV deve existir um grupo de gestão das operações com preocupações relativas a factores humanos, nomeadamente relativamente aos membros do grupo. Devem ser considerados os factores da envolvente do projecto, nomeadamente as relações da empresa com os clientes, com os fornecedores e os constrangimentos legais ou regulamentares. O método a implementar deve definir claramente os objectivos do trabalho, as funções, o valor como relação entre satisfação e utilização de recursos e o método de abordagem do trabalho. As fases criativas devem ser claramente separadas das de avaliação.

Para a prossecução destes princípios, a metodologia de AV contém nove fases, findas as quais se obtém normalmente um produto a menor custo ou com maior funcionalidade.

O projecto inicia-se com a constituição da equipa e a definição do problema. Segue-se a definição formal do problema, o objecto e configuração do estudo, objectivos gerais e de marketing, meios, participantes e avaliação preliminar do risco; depois, a operacionalização do plano com a reconstituição da equipa e definição do plano geral. Em seguida, passa-se à obtenção de dados sobre o problema, nomeadamente de forma informal em áreas técnicas, económicas e legais, estudos de mercado e informações de patentes, artigos e bibliografia; posteriormente a expressão das necessidades, análise de custos e objectivos detalhados, pela definição das necessidades e análise funcional, análise de custos, custos das funções e enumeração de objectivos detalhados; segue-se a análise funcional que permite enquadrar a criação e obtenção de novas ideias e a sua análise crítica. Estas são avaliadas, por vezes combinadas, e é escolhida a ideia a implementar com os respectivos programas

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

de trabalho; segue-se os desenvolvimentos de propostas globais, por estudos, testes, avaliação qualitativa de soluções, avaliação económica e de risco; a apresentação das propostas por selecção das soluções, programas de implementação, dados das propostas e decisão final; e, por fim, a implementação com o apoio eventual do grupo de AV, comparação de resultados de testes com os previstos e estabelecimento eventual de um sistema de recolha e disseminação de resultados [1.18].

A grande vantagem destas metodologias reside, sobretudo, na possibilidade de juntar ideias de pessoas de diversas áreas de forma estruturada, promovendo o aparecimento de ideias não divulgadas mas existentes na empresa, ou criando condições para a criação de novas ideias.

O QFD foi iniciado em 1967 com os trabalhos do Professor Yoji Akao. As primeiras tabelas foram utilizadas em 1973 na firma japonesa Mitsubishi Heavy Industries, tendo o método sido posteriormente utilizado pela generalidade da indústria automóvel do Japão dessa época. A introdução na Xerox deu-se em 1984, por D. Clausing, e a generalização do QFD é obtida com a publicação do método em 1988 [1.22].

É uma metodologia que permite estabelecer as especificações para um produto em estudo, de acordo com as necessidades dos clientes. O modelo mais conhecido baseia-se num diagrama com uma forma comparável a uma casa, a que Clausing chamou a “casa da qualidade”. O QFD tem por objectivo a criação de produtos de uma empresa, de acordo com os requisitos dos clientes e com características superiores à sua concorrência. Os requisitos dos clientes são expressos na forma de funções, ou seja, “o que se pretende”. Relaciona numa matriz as interdependências entre estas funções e as características de Engenharia que permitem fisicamente cumprir o que se pretende.

As interdependências das características de Engenharia são analisadas na matriz de correlação. As funções são ponderadas com base nas preferências dos consumidores, na facilidade de desenvolvimento e na opinião do sector de vendas. A quantificação da ponderação das funções é o critério comparativo de escolha entre hipóteses alternativas.

No lado físico do problema, as características de Engenharia são hierarquizadas e afectadas pelas ponderações das funções. A decisão de alterar estas características depende da sua importância relativa e da quantificação que caracteriza o objectivo a alcançar, dependente do mercado.

Muito embora este método possa ser utilizado em diversas fases do desenvolvimento do produto, tem sido corrente a sua utilização na fase inicial do projecto para a definição das funções de nível mais elevado.

Ciência e Projecto

A teoria de Pahl and Beitz [1.19] é, tal como a de Pugh, uma abordagem sistemática ao Projecto. Situaram a sua acção exclusivamente na área de Engenharia, ao contrário de Pugh que considerou as relações com o Marketing e as Vendas.

O Projecto de Engenharia é localizado no cruzamento entre as Ciências de Engenharia e a Tecnologia com a Economia e o Projecto industrial.

Nesta sistematização, os Sistemas Técnicos são analisados por métodos científicos, sendo estes sistemas o objecto da Ciência do Projecto. Já as metodologias de Projecto, como veículos de concretização dos sistemas técnicos, “derivam o seu conhecimento da Ciência do Projecto e da psicologia cognitiva, e da experiência prática em diferentes domínios” [Pag.10, 1.19]. Não têm, portanto, carácter de Ciência.

O projecto de um produto de produção em massa é feito em grandes fases globais. A primeira, definida normalmente como Projecto de Produto, corresponde à criação do modelo físico. Este é sujeito a testes e eventuais melhorias, seguindo-se um novo projecto para a realização de um protótipo, com novos testes e melhorias até ao projecto final, realizado para a produção em massa do produto.

No Projecto conceptual existe uma estrutura de funções e de sub-funções, que caracterizam o sistema. O sistema é considerado como um processador de entradas e saídas, que se consubstanciam em materiais, energia e sinais.

As relações entre entradas e saídas de um sistema são as suas funções, com o propósito de realização de uma determinada tarefa. Um sistema terá geralmente uma função global desagregada em sub-funções progressivamente mais definidas. As funções e sub-funções são normalmente expressas por um verbo e um substantivo, análoga à definição de função da AV.

“As sub-funções são usualmente preenchidas por processos físicos, químicos ou biológicos”, designados em termos gerais por processos físicos. Em determinados níveis de desagregação, as funções podem ser físicas ou lógicas. Nestas, pode ser importante a criação de diagramas de fluxos de funções físicas, ou de fluxos de funções lógicas.

Estas relações implicam fisicamente interfaces entre os materiais e equipamentos, pelo que é importante conhecer as suas características construtivas e de montagem. Existem ainda entradas e saídas de sinais para controlo do sistema.

Do descrito, conclui-se que num Projecto existe uma estrutura de funções, consubstanciada numa estrutura de relações físicas⁴, a que corresponde uma estrutura construtiva e uma estrutura de comando e controlo, designada por estrutura do sistema.

Para além de satisfazer o conjunto de funções e de relações entre componentes, um sistema é condicionado por um conjunto de constrangimentos relativos à segurança,

⁴ “Working structure”, no original

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

ergonomia, produção, controlo de qualidade, montagem, transporte, operação e manutenção.

Os conjuntos de estruturas descritas contêm os fundamentos das estruturas técnicas aplicadas ao Projecto. No entanto, só é possível concretizar um projecto utilizando um outro conjunto: o das metodologias. Neste intervêm processos psicológicos, estruturas de pensamento e criatividade, para o que são utilizadas diversas técnicas que guiam a criação de novas ideias. Estas técnicas, métodos e metodologias são o cerne da criatividade e, como tal, são indispensáveis ao aparecimento de novos produtos.

A obtenção de soluções face à confrontação inicial com um problema necessita de recolha de informação, da definição do problema, da criação de soluções e da avaliação das soluções com vista à decisão final. Este processo pode ser transportado para o Projecto de Engenharia, tendo em vista a optimização do princípio físico de construção, o *layout*, as formas, os materiais e a produção, recorrendo às seguintes quatro fases [Cap.3, 1.19]:

- Planeamento e clarificação da tarefa: nesta fase, é caracterizado o mercado relativo ao produto proposto, é avaliada a relação do mercado com a empresa, surgem ideias não estruturadas, é criada uma proposta guia para o produto, é clarificada a tarefa de projecto e é elaborada uma lista de requisitos;

- Projecto conceptual: corresponde à especificação de princípio de acordo com as estruturas referidas. Contém as fases de identificação dos problemas, estruturas funcionais, relações físicas, combinação de princípios físicos, criação de variantes de ideias e avaliação de ideias;

- Projecto de incorporação⁵: engloba o desenvolvimento da estrutura construtiva e a sua definição. Esta é a fase a que os autores dão maior importância. No desenvolvimento da estrutura consideram uma avaliação preliminar de cálculo e de escolha de materiais, a definição dos *layouts* e a avaliação técnica e económica. Na fase de definição pretende-se eliminar os pontos fracos do projecto, avaliar os erros, reduzir os custos e preparar a documentação para produção e montagem;

- Projecto de detalhe: nesta fase, elabora-se os documentos de produção e de operação, nomeadamente peças desenhadas e listas de componentes, instruções de produção, montagem, transporte e operação e verifica-se todos os componentes.

⁵ “Embodiment design”, no original.

1.4.4 Teoria Axiomática de Projecto e Ciência

Em contraste com as metodologias anteriores, a Teoria Axiomática de Projecto (AP) é baseada em axiomas, ou seja, verdades sem possibilidade de prova, mas para as quais não foram encontrados casos que os contradigam. A AP foi proposta por Suh em 1990, depois da sistematização de um conjunto de princípios que deveriam guiar a execução dos bons projectos.

Os axiomas são guias de desenvolvimento, a partir dos quais será possível definir algoritmos. Estes podem ser descritos em metodologias e métodos a partir dos quais são criadas as ferramentas para a sua aplicação. Deverá ser esta a forma de definir uma Ciência de Projecto, partindo dos axiomas e gerando uma estrutura que englobe progressivamente as diferentes metodologias.

A AP utiliza o conceito da independência de funcionamento e o da simplicidade do sistema. Utiliza igualmente o conceito de mapeamento entre um domínio não físico das funções, o domínio funcional, e o domínio físico dos parâmetros físicos.

Pretende-se que uma alteração no domínio físico altere a correspondente função, mas não mais do que essa função. Ou seja pretende-se “manter a independência dos requisitos funcionais” (Axioma 1).

A simplicidade do sistema é interpretada na AP com a acção de “minimizar o conteúdo de informação contido (necessária) no projecto” (Axioma 2), o que implica que o sistema funcione com o mínimo de informação, ou seja, que contenha toda a “informação” necessária ao seu funcionamento.

O conteúdo de informação definido na AP usa a probabilidade de observação de Hartley (1928). O conceito de informação foi posteriormente utilizado por Shannon (1948), para medir a informação média esperada por carácter emitido numa linha de comunicação.

Este mesmo conceito é usado na AP dependente da probabilidade de sucesso do sistema. A Figura 1.1 representa a função densidade de probabilidade (f.d.p.) de um único requisito funcional (RF). Se a tolerância de funcionamento do RF impuser um intervalo admissível de funcionamento, a probabilidade do sistema funcionar correctamente é:

$$p = \frac{\text{Área de intersecção}}{\text{Área total}} \quad (1.6)$$

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

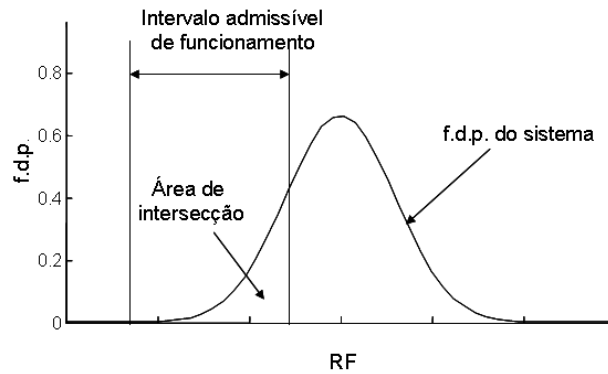


Figura 1.1. f.d.p. do sistema

A “Área total” é o integral da f.d.p., por definição igual a um. A probabilidade de funcionamento pode assim ser dada pela “Área de intersecção” ou área comum. O conteúdo de informação I , de um único RF, é assim:

$$I = \log_2\left(\frac{1}{p}\right) = \log_2\left(\frac{1}{\text{Área de intersecção}}\right) \quad (1.7)$$

Note-se que se a área de intersecção for a própria f.d.p. do sistema, o sistema tem probabilidade unitária de funcionar pelo que o conteúdo de informação é nulo. Neste ponto reside a diferença subtil da aplicação da informação de Hartley ao projecto ou à emissão de mensagens: nestas, a informação refere-se à que está contida numa mensagem emitida; no projecto, refere-se à “informação” necessária para que o sistema funcione, ou seja, à falta de “informação” presente no sistema.

Estes dois axiomas são aplicáveis a qualquer projecto em sentido lato. São, pois, adaptáveis ao projecto mecânico, ao projecto de edifícios ou de instalações. Serão igualmente aplicáveis na indústria de *hardware* e de *software*, na definição de organizações e de quaisquer outras concepções.

Segundo Suh, o “objectivo crucial da Teoria Axiomática de Projecto é estabelecer uma base científica para o Projecto e desenvolver as actividades de projecto fornecendo ao projectista uma base teórica com a qual possa tomar decisões.”

1.4.5 Teoria Axiomática como parte da Ciência

Face ao que foi dito no ponto 1.2, a discussão sobre se um conjunto de axiomas é ou não Ciência é desprovida de razão. No entanto estes axiomas têm as características indicadas em 1.2.5, ou seja, contêm os valores presentes nas teorias científicas. Os axiomas são independentes entre si, suficientes para o desenvolvimento de uma teoria e os necessários para a mesma. Para além disso, são simples com a simplicidade das coisas que encerram muita “informação”. A teoria permite ser racionalmente desenvolvida, tem

Ciência e Projecto

coerência interna, não foi encontrada qualquer teoria de Projecto que a contradissesse, têm surgido vários artigos que relacionam a AP com outras teorias, permite abrir diversas linhas de investigação, nomeadamente a presente e, sobretudo, permite prever o funcionamento de um sistema.

É, como tal, uma teoria que tem os valores de uma Ciência.

A apresentação formal da teoria, a sua articulação e associação com metodologias existentes são questões que serão desenvolvidas no próximo capítulo.

A avaliação do seu carácter científico faz-se pela conformidade das suas conclusões com a realidade física. Diversos trabalhos e exemplos têm sido desenvolvidos neste campo.

Neste trabalho será empreendida a aplicação da AP a sistemas de climatização.

Note-se que o trabalho não é circular por validar conjuntamente a AP e as suas conclusões sobre sistemas de climatização. As validações efectuadas são efectuadas perante modelos físicos; são validações de proposições singulares. Ao serem verificadas corroboram a AP como proposição universal.

1.5 Resumo e Conclusões

Existindo vários métodos, metodologias e teorias para o Projecto, analisou-se neste capítulo as características de uma Ciência de Projecto e ponderou-se se a Teoria Axiomática de Projecto poderia ser considerada científica.

Para o efeito, descreve-se sumariamente a Filosofia Positiva e as dos principais filósofos da Ciência do século XX. O Positivismo assenta em dogmas observáveis na natureza, a partir dos quais são, e foram, desenvolvidos os diversos teoremas.

As teorias racionalistas dos físicos relativistas, nomeadamente Einstein, afirmaram que a realidade pode ser obtida das conclusões retiradas de modelos, arquitectados com base em leis físicas, sem necessidade imediata de comprovação física.

A teoria de Popper sobre o método científico elimina a possibilidade de uso da indução, face à necessidade de recurso a infinitas experiências. Recorre à possibilidade de comprovação em *modus tollens*, ou seja, se a experiência não comprova a teoria, esta é rejeitada, se a comprova (corrobora), a teoria é mantida, mas não comprovada.

Kuhn associa o aparecimento de novas teorias (ou paradigmas, num sentido mais lato) à situação de tensão que ocorre quando são identificadas diversas falhas nas anteriores. O aparecimento de paradigmas passa a depender dos conhecimentos de uma época ou de uma civilização.

A ideia do contexto é amplamente utilizada por Foucault, que considera a Ciência no contexto em que é criada, no limite no contexto pessoal, num extremo de racionalismo onde

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

a razão de cada um impede a possibilidade de verificação conjunta da realidade. Esta teoria tem sido muito utilizada nas Ciências Sociais.

Admitindo que a Ciência tem de ter por base a lógica, optámos por considerar as teorias racionalistas da Física e o método de investigação sugerido por Popper. Segundo Popper, um conjunto de axiomas, tal como a Teoria Axiomática de Projecto, só pode ser considerado científico com base nas suas aplicações; na corroboração dos enunciados particulares da teoria com a experiência. Qualquer teoria, enquanto enunciado universal, não é passível de corroboração com a experiência, sendo desprovida de lógica a discussão sobre se é científica.

O Projecto, como concepção de novos produtos, tem uma fase de extrema importância, que se prende com o aparecimento de novas ideias, e uma outra, relativa à validação dessas ideias. Considerando-se a primeira fase pertencente ao psicologismo, aplicaremos o método científico descrito à segunda fase. Nesta última fase, comprovaremos as conclusões da aplicação da Teoria Axiomática de Projecto a ideias e sistemas comuns, utilizando modelos matemáticos comprovados. O Projecto é, assim, uma experiência racional com verificação das suas funções face à realidade física descrita por estruturas matemáticas.

Projectos diferentes, com características físicas diferentes, mas que repitam a mesma estrutura de funções, têm “repetibilidade funcional”. Este é, aliás, um conceito análogo ao da repetibilidade da experiência, onde se comprovam as funções físicas, não a experiência física.

1.6 Contributos, Opinião e Prosseguimento

São contributos deste capítulo a apresentação da Teoria Axiomática de Projecto (AP) no âmbito da filosofia da Ciência e o esclarecimento em que medida a AP é científica. Introduziu-se o conceito de repetibilidade funcional nos projectos e a sua relação com a repetibilidade nas experiências físicas. A repetibilidade em Projecto é funcional, inesperadamente equivalente à repetibilidade das experiências. Tal como nas experiências físicas, a repetição do fenómeno ocorre no domínio funcional, e não no dos equipamentos que servem à experiência.

Demarcou-se ainda as áreas de Projecto que podem ter uma avaliação científica, das outras áreas, que apesar da sua extrema importância na concepção de produtos, não pertencem à Ciência. Pertence à Ciência a experiência racional com comprovação física das suas consequências.

É nossa opinião que a AP poderá desenvolver-se no sentido de constituir regras e metodologias de abordagem em diversas áreas, abarcando progressivamente métodos e

Ciência e Projecto

heurísticas existentes. Esta tese define algumas destas regras para efeitos da definição de sistemas de Climatização.

Há que considerar que a Ciência não é holística. Existem muitos conhecimentos úteis externos à Ciência. A tendência actual de considerar todos os conhecimentos úteis como científicos, levará certamente à descaracterização do que é Ciência e consequentemente à perda da sua relevância social.

São domínios de desenvolvimento deste capítulo a avaliação das consequências sociais da Ciência do contexto; a caracterização do papel social da Engenharia; e a relação que exista entre o optimismo epistemológico com a Ciência, a Ecologia e a Religião.

Capítulo 10

Fecho

“Jacinto, em Paris, sempre abominara favas! ...
Tentou todavia uma garfada tímida – e de novo aqueles
seus olhos, que o pessimismo enevoara, luziram,
procurando os meus.”

Eça de Queiroz, in *A Cidade e as Serras*,
1ª Edição em 1901

A Geografia e, por inerência, o Clima têm um papel fundamental na definição das mais variadas actividades humanas.

Ora, a Climatização está intimamente ligada à Geografia, seja pelas condições exteriores, que influenciam as cargas térmicas interiores e do ar novo, seja pelo tipo de vestuário utilizado pelas pessoas, seja ainda pelas condições psicológicas associadas a hábitos locais. Esta realidade tem sido esquecida na definição dos sistemas de climatização, pretendendo-se que alguns modos de permanência no interior dos edifícios, bem suportados por investigação, sejam aplicados em todo o mundo.

Na realidade, a controvérsia entre Humphreys e Fanger sobre o que são as condições de conforto é antes de mais um conflito de visões do mundo. Os sistemas implementados que usam o modelo de Fanger têm um controlo estreito das condições interiores, num quase divórcio das condições exteriores. É um exemplo do controlo da Natureza realizado nos espaços interiores. Como implicação desta linha de pensamento, os edifícios têm de ser estanques, os caudais de ar controlados, o ar exterior sujeito a sistemas de filtração exigentes. A Natureza representa para estes sistemas a agressão, suposição com certeza válida em locais com climas extremos. Em Portugal e em outros países com climas amenos, decerto que não.

Humphreys propõe o ajustamento da temperatura interior de acordo com a exterior e a possibilidade de abertura de janelas. Esta abertura permite a entrada de ar exterior sem consumo adicional de energia para a sua movimentação, é um veículo de arrefecimento e, ao mesmo tempo, melhora a qualidade do ar interior. Estas soluções não são necessariamente incompatíveis com a presença de sistemas activos, antes permitem criar sistemas mistos com sinergias.

Esta deverá ser a principal linha de investigação para os sistemas de climatização, a desenvolver nos países do Sul da Europa.

10.1 Resumo do Trabalho

Neste trabalho aplicou-se a Teoria Axiomática de Projecto (AP) a diversos sistemas de climatização.

A AP fundamenta-se em dois axiomas. O axioma da independência ou primeiro axioma, descrito como, “manter a independência dos requisitos funcionais”; e o axioma 2 ou da informação, que enuncia que a informação contida no projecto deve ser minimizada.

Estes axiomas estabelecem que um projecto correctamente definido pode cumprir qualquer requisito funcional independentemente dos restantes. Além disso, idealmente, o funcionamento do sistema ocorrerá sempre dentro dos limites especificados no projecto.

O Projecto, entendido neste contexto como uma nova concepção, é o processo de mapeamento entre o domínio das funções e o domínio físico. A este processo corresponde uma decomposição hierárquica das funções e dos parâmetros, numa relação mútua de interdependência.

O primeiro domínio, o funcional, descreve “o que se pretende obter” descrito pelos requisitos funcionais (RF); o segundo define “como se obtêm” fisicamente os requisitos anteriores na forma de parâmetros físicos de projecto (PP). A relação entre ambos é descrita pela equação $\{RF\} = [A] \cdot \{PP\}$, sendo A a matriz de projecto. Num projecto independente a matriz A é diagonal; se a matriz for triangular inferior ou superior o projecto é desacoplável e terá de haver uma sequência própria de ajuste de PP; nos restantes casos, o projecto é acoplado. Um projecto deve ser preferencialmente independente, ou eventualmente desacoplável.

Face a um conjunto de soluções independentes, devem ser escolhidas as que tenham menor informação. Numa situação ideal, deverá existir pelo menos uma solução com informação nula. Neste caso, garante-se que os RFs estão sempre dentro dos limites definidos em projecto.

Para se determinar a informação é necessário conhecer a função densidade de probabilidade do sistema calculada no domínio funcional. Face à dificuldade de determinação desta função, propôs-se a utilização de conjuntos vagos para a obtenção de uma função de pertença (f.p.) do sistema, obtida a partir de uma regra de implicação entre os PPs e os RFs.

A AP relaciona-se com diversos métodos de Projecto de aceitação generalizada. Foram apresentadas diversas semelhanças entre a AP e as soluções inventivas do TRIZ, existem semelhanças formais de manipulação entre as matrizes DSM e as matrizes de projecto da AP, a abordagem funcional é comum nos métodos QFD e na AV e finalmente, a

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

minimização da informação é análoga à redução da relação sinal ruído do Projecto robusto de Taguchi.

A aplicação da AP a um projecto requer também um método. Optámos por considerar uma abordagem racionalista, aliás comum na Física. É possível, por articulação das leis da física e pela aplicação da lógica, obter consequências do funcionamento de sistemas. A experimentação ocorre no domínio racional. Ou de outro modo, após a fase de aparecimento de novas ideias, aplica-se a teoria AP na fase da sua validação. Nesta última fase, comprovámos as conclusões da aplicação da AP a ideias e sistemas comuns, utilizando modelos de simulação.

As principais funções de um sistema de climatização foram enunciadas, usando as normas existentes sobre o assunto. Obteve-se os dois principais desígnios de um sistema de climatização, que são expressos nas funções: “assegurar as condições térmicas apropriadas” e “assegurar ambientes interiores saudáveis”.

Estas funções enquadram-se, nomeadamente, nas normas EN 15251 e na EN 13779, associadas ainda à ISO 7730.

Da decomposição das funções referidas, até ao nível comum aos vários sistemas de climatização, obtêm-se as funções relativas aos sistemas de controlo de temperatura interior, à difusão do ar, ao controlo de insuflação de ar exterior e à filtração.

Devido aos problemas de energia das últimas décadas, um sistema deve ainda ser capaz de ter um consumo de energia reduzido. Para esse fim, contribui não apenas o sistema, mas o edifício como um todo. Neste sentido, o estudo da função relativa à redução do consumo de energia contemplou também o papel do edifício.

A escolha das funções e parâmetros relativos a esta função considerou a norma ASHRAE 90.1 e a directiva congénere europeia, EPBD. Esta directiva foi transcrita para a legislação dos diversos países da UE, tendo-se utilizado para validação das escolhas das funções, algumas das suas transposições. Abordou-se também a norma EN 15251, norma destinada a apoiar a aplicação da EPBD.

Para a decomposição da função relativa ao conforto térmico, seguiu-se o modelo de Ole Fanger pela sua possibilidade de quantificar os estados de conforto. Este modelo utiliza o voto médio previsível, VMP, para determinar a percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições interiores, PPI. Com este índice, calcula-se facilmente o somatório anual das pessoas previsivelmente insatisfeitas com o conforto térmico, que foi utilizado para comparar o funcionamento dos sistemas.

A decomposição da função relativa à qualidade do ar interior seguiu as normas EN 13779 e a ASHRAE 62.1. Esta norma estabelece caudais de ar inferiores aos referidos nas

normas europeias. Em qualquer das normas define-se a qualidade interior do ambiente em função do caudal de ar novo e da concentração de poluentes.

Para avaliar em que medida os sistemas cumprem os requisitos funcionais, introduziu-se o conceito de eficiência funcional, EF, dada pela razão entre o número de pessoas·hora na gama definida para o projecto e o número total anual de pessoas·hora. A EF foi calculada para cada sistema de climatização relativamente à qualidade do ar interior, QAI, e ao conforto. Na definição das condições de conforto, tomou-se a temperatura operativa no intervalo de 20 °C a 24 °C. Estes valores consideram o efeito da produtividade, sendo ligeiramente inferiores aos da gama de grande conforto do modelo de Fanger. Para a qualidade do ar, definiu-se um caudal de ar novo por pessoa na zona ocupada de 35 m³/h.

Aplicou-se a AP à avaliação dos sistemas de climatização, de acordo com as funções anteriormente referidas, a quatro tipos de sistemas. Foram eles, os sistemas de volume de ar variável (VAV) e três sistemas com ar novo dedicado, constituídos pelos sistemas com ventiloconvectores (VC), com tectos arrefecidos (TA) e com unidades de indução (UI).

Realizou-se, ainda, um conjunto de programas de simulação de cada um dos sistemas, que permitiram confirmar as situações de falha dos sistemas, identificadas pela prévia aplicação da AP.

Os sistemas VAV funcionam com temperatura de insuflação geralmente constante, adaptando-se à carga a remover por variação do caudal de insuflação nas caixas VAV de cada espaço. Construindo a matriz de projecto para este caso, resulta que o sistema VAV é acoplado. Na realidade, o caudal de ar novo entregue em cada zona, em cada momento, depende não só da sua carga térmica, mas também da que ocorre nas restantes zonas. Além disso, a necessidade de insuflar um caudal de ar novo mínimo em cada espaço obriga que cada caixa VAV admita um caudal mínimo, que quando vem arrefecido poderá causar desconforto. A solução adoptada neste sistema para este desconforto é, normalmente, a introdução de baterias de reaquecimento terminal.

Em termos de conforto térmico, os sistemas VAV, desde que se considere que têm reaquecimento, cumprem os requisitos funcionais analisados. Já em termos de qualidade do ar, o sistema VAV não permite cumprir geralmente uma eficiência funcional unitária. No entanto, para o exemplo estudado, obteve-se EF unitária para um caudal de ar novo constante superior a 50 m³/(h·ps).

Já os sistemas com ar novo dedicado insuflam o caudal de ar novo necessário a cada espaço, a partir de unidades de tratamento de ar novo (UTAN). Assim, cumprem os requisitos impostos em termos de caudal de ar novo.

Num sistema com VC, o ar novo é insuflado nos espaços às condições médias interiores. A carga térmica interna é removida na bateria de arrefecimento ou introduzida pela bateria de aquecimento, em modo de aquecimento. A matriz de projecto deste sistema

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

mostra que o sistema é independente, pelo que a função de conforto térmico não é afectada pela da qualidade do ar. Mesmo adicionando uma função relativa à filtração em cada espaço, este sistema mantém-se independente incorporando os filtros necessários em cada unidade.

Já os sistemas com TA só são independentes se se desprezar a função de filtração e se o ar novo não interferir na remoção de carga térmica. Esta é removida por efeitos conjuntos de convecção e de radiação, não permitindo, para as implementações correntes deste sistema, o funcionamento simultâneo nos modos de aquecimento e de arrefecimento. Neste sentido, o sistema não apresenta eficiência funcional unitária relativa ao conforto térmico. Além disso, não consegue fisicamente remover as cargas comuns que ocorrem nos edifícios em Portugal.

Os sistemas com unidades de indução (UI) utilizam ar primário, geralmente apenas ar novo, para provocar um fluxo induzido de ar do ambiente nas UI. Este fluxo passa por uma bateria, onde é arrefecido, misturando-se de seguida com o ar primário. O ar primário tem um caudal normalmente bastante superior ao caudal de ar novo necessário, pelo que a eficiência funcional relativa a este requisito é unitária. Utilizando-se um caudal de ar primário elevado, há a capacidade de aproveitamento de arrefecimento gratuito. Nestes sistemas, a carga a remover depende não apenas das baterias das unidades interiores, mas também da temperatura a que o ar primário é insuflado. Este é insuflado frio a uma temperatura constante. Assim, há situações em que o ar primário causa arrefecimento excessivo nos espaços servidos. Mais uma vez, este problema pode ser resolvido utilizando baterias de aquecimento nas unidades terminais.

Neste caso, e desprezando mais uma vez a função de filtração, o sistema é desacoplável, ou como foi referido tecnologicamente desacoplável. Sem baterias de reaquecimento o sistema é acoplado, situação em que o sistema não consegue cumprir a eficiência funcional relativa ao conforto térmico.

Ou seja, dos sistemas apresentados, devem ser escolhidos para implementação os sistemas com VCs por constituírem uma solução independente. Nas situações em que exista apenas arrefecimento com uma carga interna baixa, podem ainda ser utilizados os sistemas com tectos arrefecidos. Existem ainda várias variantes de sistemas com TA e com UI que são tecnologicamente desacopláveis por fixação de parâmetros. De acordo com a AP, poderão se implementados, mas os referidos parâmetros não poderão variar ao longo da vida do sistema. Mais ainda, estes sistemas serão mais influenciados por pequenas variações de parâmetros do que os sistemas independentes.

Analisou-se então os consumos de energia de um edifício com um sistema com VC. O consumo de energia no sistema de climatização depende do edifício em que se encontra

instalado. Por isso, começou por decompor-se a função associada ao consumo de energia no edifício.

Desta decomposição, concluiu-se que as características da envolvente devem ser definidas após a caracterização do uso do edifício. Além disso, o tipo de sistema de aquecimento de AQS deve ser definido após avaliação dos sistemas locais de produção de energia.

Simulando-se o comportamento de três edifícios, efectuou-se uma avaliação paramétrica, da qual se obtiveram as seguintes conclusões:

Existindo controlo de iluminação, a utilização de envidraçados neutros, em vez de coloridos, é uma medida de redução do consumo de energia;

A alteração da massa interna do edifício ou o aumento no isolamento da envolvente, relativamente aos valores usualmente adoptados, não contribuem para a redução do consumo de energia;

Aproveitando o arrefecimento gratuito, é possível duplicar o caudal de ar novo, melhorando as condições interiores, sem que haja aumento significativo do consumo de energia.

De seguida, avaliou-se o desempenho energético do sistema de climatização utilizado. Do mapeamento, verificou-se que os parâmetros usados para dimensionamento das instalações, ou sejam as perdas de carga e as temperaturas de operação das redes, têm influência em diversos requisitos funcionais.

Com base na simulação de um dos edifícios mencionados, fez-se, ainda, uma avaliação multi-variada a quinze parâmetros definidores de um sistema de climatização. Desta avaliação, obteve-se as seguintes conclusões:

A opção por caudal variável nos circuitos hidráulicos não tem uma expressão significativa na redução do consumo de energia;

A recuperação de calor na UTAN é um elemento que agrava o consumo de energia. A sua utilização deve ser associada a unidades com reduzida velocidade facial;

As UTAN devem utilizar caudal variável nos ventiladores, com um controlador que receba os valores medidos das necessidades de caudal. O consumo de energia nas UTAN é determinante para o consumo geral do sistema;

A recuperação total de calor no GPFC, vulgo *chiller* com recuperação total, é uma solução que contribui para o aumento do consumo de energia, ao contrário da recuperação parcial, que permite reduzi-lo;

Deve ser dada especial atenção à adaptação do GPFC a cargas parciais;

Aumentos da temperatura nos circuitos de água arrefecida só devem ser usados se não implicarem aumento de consumo da energia necessária à movimentação do ar.

Então, utilizando algumas das conclusões da avaliação efectuada, simularam-se em igualdade de circunstâncias os sistemas indicados. Para o efeito, construiu-se programas de avaliação do consumo de energia para cada um dos sistemas. Os menores valores de consumo de energia ocorrem nos sistemas com tectos arrefecidos. Estes sistemas permitem que um GPFC funcione a uma temperatura mais elevada, não tendo além disso consumo nas unidades interiores. Os sistemas com UI têm um consumo ligeiramente mais elevado, comparável ao dos sistemas com VC.

O arrefecimento gratuito motivado pelo elevado caudal de ar primário, contribui determinantemente para a eficiência energética dos sistemas com UI. Os sistemas VAV têm, geralmente, um maior consumo de energia.

Os sistemas devem ainda cumprir o segundo axioma da AP. Optou-se por analisar apenas as condições de qualidade do ar interior, como contributo para definir o caudal de ar novo necessário. A partir da normativa europeia, escolheu-se para aplicação deste axioma o sistema com VC, dado ser o único sistema independente que tem condições de cumprir todos os requisitos funcionais. No entanto, a avaliação efectuada é suficientemente genérica para poder ser aplicada a outros sistemas.

Para o efeito, estimaram-se as funções de desempenho com diversos caudais de ar novo e eficiências de filtração variáveis, utilizando implicações de lógica vaga. Utilizou-se três regras de implicação, baseadas na EN 13779. Determinou-se, com base nestas regras, os consequentes da implicação e, por agregação do conjunto dos consequentes, a função de pertença, f.p. Definiu-se ainda dois níveis de satisfação, superior a 80% e superior a 90%. Para estes níveis de satisfação e para a aplicação mais estrita da norma referida, obteve-se um caudal mínimo de $63 \text{ m}^3/\text{h}$ por 10 m^2 . Este valor pode ser confundido com o caudal por pessoa, já que a área usada é típica da ocupação média num edifício de serviços. O nível de filtração exigido é o F7.

Propôs-se então um novo sistema de climatização. Este difere de um sistema comum com ventiloconvectores, por insuflar o ar novo às condições exteriores numa ampla gama de temperaturas. Este sistema foi aprovado pelo INPI como modelo de utilidade, registado com a referência MU 10211. Permite cumprir os requisitos de conforto térmico e de qualidade do ar em todas as zonas e em qualquer momento, tendo além disso um baixo consumo de energia.

Comparou-se este sistema com os restantes sistemas independentes ou desacopláveis, para os quais se impôs os novos requisitos de caudal de ar novo e nível de filtração, ou sejam respectivamente $63 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ e filtros F7. Concluiu-se que o sistema MU com caudal de ar variável apresenta o menor consumo de energia; os sistemas com UI apresentam o

menor número de insatisfeitos com a qualidade do ar; os sistemas com VC e o MU apresentam os melhores resultados em termos de conforto térmico.

10.2 Principais Conclusões de acordo com a Teoria Axiomática

Utilizando os teoremas da Teoria Axiomática de Projecto é agora possível perceber as suas implicações e até reenunciar os seus axiomas e teoremas, quando aplicados aos sistemas de climatização. Os diversos Corolários e Teoremas da AP são apresentados no Anexo deste trabalho.

Em consequência, propõe-se os enunciados a seguir indicados como teoremas para o projecto de sistemas de climatização (TSC), formulação que é suportada pela decomposição funcional descrita nos capítulos quatro e quinto e pelos resultados expostos no capítulo sete.

TSC 1- Directamente do primeiro axioma da AP conclui-se que um sistema de climatização deve, em cada momento, poder introduzir o caudal de ar novo necessário à instalação, independentemente da carga térmica interna a tratar.

TSC 2- Do Teorema 5, retira-se que acrescentar novas funções aos sistemas, nomeadamente funções relativas à filtração, exige que os sistemas sejam completamente estudados, não sendo apenas necessário acrescentar filtros nas UTAs.

TSC 3- Conclui-se do Teorema 6, que uma correcta escolha dos PPs permite que um projecto de climatização independente, por exemplo com VC, possa responder ao conjunto de RFs prescritos.

TSC 4- Por outro lado, é de esperar que o controlo de um sistema VAV, ou de UI sem reaquecimento, seja mais difícil de conseguir que o controlo dos restantes sistemas estudados, dado que os primeiros são sistemas acoplados (Teorema 19).

TSC 5- Há ainda a considerar que se um sistema é acoplado por não considerar as funções de aquecimento, a introdução de baterias de reaquecimento permite resolver este problema (Teorema 2). Esta é a solução utilizada nos sistemas VAV e nos sistemas com UI. Mais ainda, se o sistema for acoplado por falta de caudal de ar novo, o problema pode ser resolvido por introdução de um sistema autónomo de introdução local de ar novo.

TSC 6- Um sistema com VC que funcione em modo de aquecimento e de arrefecimento, tem possibilidade de garantir intervalos de projecto mais estreitos que os restantes sistemas, dado que um sistema independente tem geralmente menor informação que os sistemas desacopláveis ou acoplados (Teorema 18).

TSC 7- A redução dos intervalos dos requisitos funcionais relativos à temperatura podem tornar acoplados os projectos com sistemas com UI com reaquecimento. Por outro lado, se o caudal de ar novo tiver de ser garantido em todas as situações, então um sistema VAV tem condições para funcionar de forma deficiente (Teorema 20).

TSC 8- Deve existir um sistema independente que consuma menos energia do que um sistema acoplado ou desacoplável, dado que do teorema TSC 5 estes sistemas necessitam de sistemas complementares com funcionamento antagónicos.

10.3 Principais Contributos, Opinião e Prosseguimento

Constituem contributos deste trabalho a aplicação da Teoria Axiomática de Projecto (AP) aos sistemas de Climatização. Estes foram encarados de acordo com os requisitos do utilizador, sustentados sobretudo pelas normas existentes. Elegeram-se como funções de nível mais elevado o conforto, a qualidade do ar e o consumo de energia no edifício.

Pela aplicação desta teoria, obteve-se um mapeamento hierárquico das funções e parâmetros de projecto. Integrou-se o consumo de energia do sistema de climatização num âmbito mais alargado do consumo do próprio edifício, o que permitiu analisar as dependências entre a concepção do edifício e os seus sistemas.

Já para as restantes funções, conforto térmico e qualidade do ar, supôs-se que poderiam ser consideradas independentes das outras que existam no edifício.

Do mapeamento da função relativa à energia, identificou-se a dependência das características da envolvente com a carga interna do edifício; a relação entre iluminação natural e artificial; e a possível contribuição positiva do ar novo para a carga térmica. Em particular, relativamente ao sistema de AVAC, realça-se a necessidade de definição das condições de temperatura das redes, em particular da rede hidráulica; e destaca-se ainda a necessidade de definir limites para as perdas de carga das redes aerífera e hidráulica.

É outra contribuição, o mapeamento efectuado para cada um dos sistemas de climatização considerados. Com base nestes mapeamentos foi possível enquadrar algumas deficiências conhecidas dos sistemas, permitindo a sua classificação. São elas, em particular, o acoplamento entre o caudal de ar novo e de insuflação nos sistemas VAV ou entre o ar primário arrefecido e a remoção da carga interna nos sistemas com UI. Esta última situação ocorre igualmente nos TA desde que o ar seja sobre-arrefecido.

São ainda contributos a realização de programas de simulação dos vários sistemas em iguais situações e com os mesmos pressupostos. Uma das vertentes destes programas, foi a avaliação do consumo de energia de cada um dos sistemas, concluindo-se que existem sistemas independentes com consumos de energia menores que outros sistemas conhecidos como energeticamente eficientes. Estes programas permitiram ainda fazer uma análise multi-variada com quinze variáveis e determinar as que mais contribuem para o consumo de energia. De notar o importante efeito positivo do caudal variável na UTAN, da redução da sua perda de carga e da melhoria da eficiência nos GPAR.

São ainda contributos deste trabalho, a aplicação de conjuntos graduados ao cálculo da informação do requisito funcional da qualidade do ar e a formulação de um programa de cálculo para a computação desta informação.

Finalmente, é contributo a apresentação do sistema MU 10211, sistema que está de acordo com os dois axiomas da AP e que utiliza o ar exterior como veículo de arrefecimento.

Deste trabalho apresentam-se as seguintes linhas de desenvolvimento.

Pressupostos para definir um sistema de climatização:

Avaliar a necessidade fisiológica, médica, de sistemas de filtração que mantenham o ambiente interior com uma concentração de partículas inferior à do ambiente exterior;

Avaliar qual o nível de contacto humano com partículas e microrganismos que garantam simultaneamente a salubridade dos espaços e o estímulo do sistema imunológico;

Avaliar as consequências de sujeitar pessoas a concentrações de poluentes mais elevadas, de modo controlado, desde que por períodos curtos, mantendo-se a concentração média em valores apropriados;

Quantificar os custos da não produtividade e da factura de energia em sistemas mistos, activos e adaptativos;

Determinar as variações de produtividade das pessoas em espaços que usem sistemas adaptativos, provocadas pelo aumento da temperatura e pelas variações na taxa de ventilação;

Determinar as perdas de produtividade associadas a sistemas que impeçam a abertura de janelas, devidas à permanência das pessoas em ambientes pouco naturais;

Definir quais os parâmetros determinantes para a qualidade do ar interior. Avaliar se depende do caudal de ar novo mínimo, se é uma função da concentração máxima de poluentes, ou ainda, se deve ser definida com base em valores médios diários;

Definir qual o papel dos sistemas de filtração e que requisitos devem ser cumpridos em cada sala.

Estudos sobre sistemas e equipamentos de climatização:

Publicar dados para escolha de ventiladores com funcionamento a cargas parciais;

Analisar em que condições devem ser aplicadas as máquinas frigoríficas com recuperação parcial e total;

Refazer a análise multi-variada de sistemas de climatização em aplicações de edifícios comerciais, hotéis, hospitais, residências e outras aplicações julgadas convenientes, em diversas localizações, com vista à criação de códigos de boa prática de projecto;

Optimizar o consumo de energia do sistema de climatização MU 10211 em função das temperaturas de insuflação em modo de arrefecimento e de aquecimento;

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Avaliar as características físicas a que os ventiloconectores devem obedecer, nomeadamente quais as potências de baterias;

Continuar o desenvolvimento de ventiloconectores com velocidade variável e avaliar o comportamento deste tipo de sistemas;

Discutir as características dos sistemas em função do clima, integrando no seu funcionamento o arrefecimento gratuito, a ventilação natural e a iluminação natural, nomeadamente pela utilização de sistemas mistos de climatização.

Alteração da normativa e regulamentação:

Rever a regulamentação de modo a criar abordagens regulamentares diferentes para edifícios de serviços e residenciais. Na realidade, há diferenças significativas de cargas e necessidades de iluminação entre os edifícios de serviços e os edifícios residenciais. Neste sentido, a definição dos factores solares de envidraçados, da inércia e da condutibilidade das paredes devem ter abordagens diferenciadas;

Definir intervalos para as áreas de envidraçados e factores solares de edifícios de serviços, considerando a sua orientação, de modo a resolver os conflitos entre as necessidades de iluminação e a concomitante introdução de carga térmica;

Definir, de modo análogo, intervalos para os parâmetros de perda de pressão e temperatura de funcionamento das redes hidráulicas e aeríferas;

Impor na normativa aplicável limites mais restritivos para a escolha de unidades de tratamento de ar. Considerar como referência o nível SFP 3 em vez do SFP 4, como hipótese de solução;

Discutir a necessidade de garantir o controlo de partículas, como requisito funcional. Se não for necessário, então devem ser eliminados os correspondentes parâmetros de projecto da normativa relacionada.

Avaliar qual o maior intervalo de variação da temperatura interior e discutir a necessidade de garantir o caudal de ar novo em todas as horas ao longo do ano;

Avaliar o nível de filtração a utilizar e quais as reais consequências para a saúde pública de níveis de filtração menores. Na realidade, a norma ASHRAE 61.2 propõe para as UTAN uma classe de filtração equivalente à G4, enquanto a EN 13779 propõe a classe F7;

Rever a norma EN 13779 relativamente ao papel dos sistemas de filtração;

Enquadrar o real papel da eficácia de ventilação na definição do caudal de ar novo, em sistemas que funcionem quase permanentemente em modo de arrefecimento.

Aspectos sociais do consumo de energia:

Inquirir se o aumento do consumo de energia resulta de um conjunto cada vez maior de funções, ao dispor das sociedades;

Avaliar qual a redução destas funções que reduziria as necessidades de energia e quais os seus impactos sociais;

Investigar que organização urbana deverá surgir de modo a garantir a sustentabilidade energética das sociedades;

Simular o impacto da sustentabilidade energética nas futuras organizações sociais.

Teoria Axiomática de Projecto:

Integrar sucessivamente na AP os diversos métodos de Projecto, de produto e de processo;

Mapear e aplicar a empresas a AP. Utilizar a decomposição entre os diversos domínios, desde as áreas de Marketing, a montante, até às áreas comerciais, mais a jusante;

Avaliar o interesse da comunidade científica na realização de trabalhos de investigação sobre sistemas acoplados e avaliar o seu interesse económico ao nível das empresas.

Filosofia da Ciência:

Reavaliar as diferenças entre as Ciências Naturais e as Ciências Sociais, face à inesperada equivalência entre a repetibilidade funcional e a repetibilidade das experiências;

Avaliar as consequências sociais da Ciência do contexto;

Relacionar o desenvolvimento económico sustentado e a Ecologia, relacionando-os com o optimismo epistemológico científico e as suas relações com a Religião.

Capítulo 2

Teoria Axiomática de Projecto

“Design is important because it determines the ultimate outcome of engineering activities, including the manufacture of goods, improvement in the quality of life, and the provision of defense needs.”

Nam P. Suh, 1990

2.1 Introdução

No capítulo 1, analisou-se as características de uma teoria científica, abordou-se a relação entre Projecto e Ciência e definiu-se a geografia da Ciência de Projecto. Foram resumidos os métodos e metodologias mais aplicados em Projecto e apresentou-se os fundamentos da Teoria Axiomática de Projecto (AP). Da análise efectuada, pode afirmar-se que a AP tem as características de uma teoria científica. A AP permite prever situações de mau funcionamento de sistemas e identificar as suas causas. Estas situações podem, eventualmente, não ser passíveis de identificação em experiências de campo, sem o conhecimento prévio das condições em que ocorrem.

É de grande importância a aplicação de uma teoria que oriente o projecto de sistemas de grandes dimensões. É assim possível verificar a qualidade do projecto nas áreas com possibilidade de comprovação física. A teoria permite guiar e avaliar as ideias que surjam nos grupos de trabalho, independentemente da origem das mesmas, sem que as interacções psicológicas, dependentes do peso de cada indivíduo no grupo, interfiram na decisão.

Neste capítulo, apresenta-se os axiomas, corolários e teoremas da AP e o seu modo de aplicação. Seguir-se-á, sempre que não indicado expressamente, a exposição de Suh da AP de acordo com a bibliografia publicada em 1990 [2.1], 2001 [2.2] e 2005 [2.9].

O projecto em aplicação da AP é descrito por uma equação que relaciona os requisitos funcionais (RFs) no espaço de funções, com os parâmetros de projecto (PPs) no espaço físico. São ainda analisadas deduções do primeiro axioma e identificadas tipologias possíveis de projectos que o violam, bem como as suas consequências.

Finalmente, coloca-se o problema das tolerâncias dos PPs e seus efeitos no comportamento do sistema.

Utilizando a equação de projecto, apresenta-se ainda um método de identificação dos tipos de projectos com base na teoria de grafos. Desta teoria consta um resumo em apêndice.

Teoria Axiomática de Projecto

Depois, apresenta-se o conceito de Informação. Como exposto no Capítulo 1, a informação depende da probabilidade de cumprir os requisitos funcionais, expressos por funções densidade de probabilidade (f.d.p.). Sendo por vezes difícil obter a f.d.p. de um RF, são apresentadas em alternativa a teoria de crença de Dempster e de conjuntos vagos. Os conjuntos vagos têm especial interesse para este trabalho, pelo que se apresenta um breve resumo da sua teoria em apêndice.

A estrutura da AP, os seus axiomas, corolários e teoremas são expostos em anexo.

São ainda identificadas algumas das relações entre a AP e métodos ou metodologias descritos no capítulo anterior.

2.2 Os Axiomas

A Teoria Axiomática de Projecto tem por base dois axiomas, apresentados de modo geral no capítulo anterior:

Axioma 1 ou axioma da independência:

- Manter a independência dos requisitos funcionais;

Axioma 2 ou axioma da informação:

- Minimizar a informação contida no projecto.

O axioma 1 pretende que o ajuste de um PP afecte apenas o correspondente RF, sem afectar outros requisitos funcionais. Suh propõe que, de todas as soluções consideradas que garantam o axioma 1, devem ser escolhidas as com menor conteúdo de informação, preferencialmente com conteúdo nulo [Cap.3, 2.1].

2.3 Domínios e Mapeamento

Qualquer produto tem de ser fabricado ou tornado efectivo com o intuito de satisfazer as necessidades dos clientes. Esta verdade insofismável do Marketing aponta para dois domínios extremos: o das necessidades do cliente e o do processo de fabrico. O domínio das necessidades do cliente representa, genericamente, todas as formas elaboradas de necessidades que se pretendem suprir, originadas no indivíduo ou na sociedade, por vezes determinadas por via legislativa. A sua identificação é um dos objectivos das áreas do conhecimento, designadas por Marketing. Já o domínio do processo de fabrico representa o conjunto de variáveis intervenientes na concretização do produto, designadas genericamente por tecnologias.

O salto, da necessidade para a concretização, é feito pela concepção do produto, ou Projecto. Determina a concepção, o conjunto de características a que o produto deve obedecer com possibilidade física de produção.

Existem, assim, dois domínios na concepção: o da caracterização do produto, designado no contexto da AP por domínio funcional, e o da concretização física ao nível do projecto, designado por domínio físico. Estes domínios aparecem igualmente nas metodologias anteriormente descritas de Pugh, e de Pahl e na teoria de Hubka.

Existem quatro domínios, que são necessários percorrer, até atingir-se a produção do produto: o do cliente, que incorpora as necessidades do cliente; o funcional, com a caracterização do produto por requisitos funcionais; o físico, com os parâmetros de projecto; e o de processo, com as variáveis para o processo de fabrico. Os vários domínios podem ser esquematizados na figura seguinte [Cap 1, 2.2]:

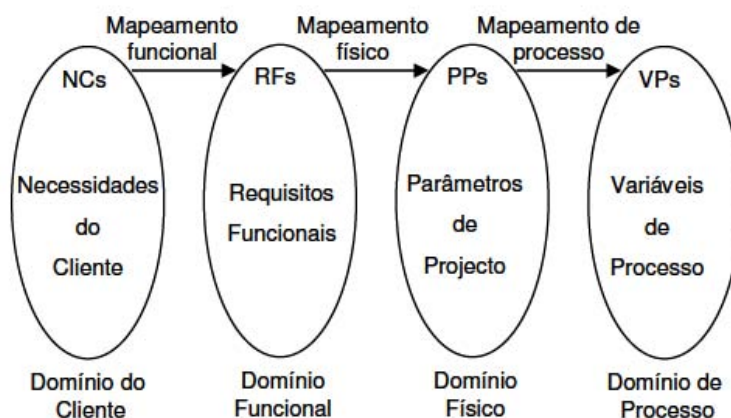


Figura 2.1. Processo de mapeamento

Nesta figura, são reveladas as relações entre os domínios referidos. Da identificação das necessidades do cliente devem surgir os requisitos funcionais, no processo designado por mapeamento funcional ou Projecto funcional. Dos requisitos funcionais surgem os parâmetros de projecto pelo mapeamento físico ou Projecto. O Projecto é, então, o processo que se desenvolve entre os domínios funcional e físico. Finalmente, as variáveis de processo são obtidas a partir dos parâmetros de projecto pelo mapeamento de processo, também designado por projecto para fabrico ou preparação de obra.

A grande diferença entre a abordagem de Suh e a de outros autores, que utilizaram domínios para mapeamento no projecto, reside no facto de a AP descrever o projecto simultaneamente nos vários domínios simultaneamente. Nas metodologias apresentadas no Capítulo 1, após o total preenchimento do domínio funcional passar-se-ia ao preenchimento do domínio físico. Ao contrário, na AP, a interacção entre os domínios é permanente.

2.3.1 Funções

Os Requisitos Funcionais existentes no domínio funcional têm imagens no domínio físico, designadas por Parâmetros de Projecto. Projectar é escolher os PPs que permitem cumprir os RFs que se desejam concretizar.

O RF k de um nível i , designado por $RF_{i,k}$, é decomposto em vários requisitos j independentes, no nível imediatamente inferior, $i+1$, de modo que:

$$\bigcup_j RF_{i+1,j} = RF_{i,k}, \text{ e } \bigcap_j RF_{i+1,j} = \emptyset \quad (2.1)$$

A novidade introduzida pela AP no processo de decomposição de funções reside na identificação de uma relação ontológica entre os RFs e os PPs. A escolha de um PP a um determinado nível de decomposição, influencia os RFs de nível imediatamente inferior. Por exemplo, se a função é “climatizar um espaço”, a escolha entre sistemas de climatização activos ou passivos determinará funções diferentes nos níveis inferiores.

Por outro lado, as novas funções deverão ser executadas por novos PPs contidos nos parâmetros anteriormente escolhidos. Designa-se este processo de ziguezague entre os domínios funcional e físico por mapeamento físico, ou Projecto.

Em qualquer das etapas de decomposição dos RFs, os axiomas referidos no parágrafo 2.2 devem ser satisfeitos. Quanto menor for o número de RFs de elevado nível, mais simples será a realização do projecto. Refere-se, na literatura da AP, que o sucesso do voo do aeroplano dos irmãos Wright em 1903 deveu-se à escolha do menor número de funções que garantissem o voo, em vez de tentarem copiar as funções associadas ao voo das aves.

Um menor número de funções facilita o processo de idealização dos PPs e melhora a clareza da definição.

Identificar o, ou os RFs dos níveis mais elevados que consubstanciem a realidade do projecto é uma das actividades mais importantes. Na realidade, a equipa de projecto recebe muitas vezes indicações imprecisas relativamente à qualidade pretendida para o trabalho, onde se misturam RFs e PPs de diversos níveis com indicações de constrangimentos. Identificar os RFs de maior nível com essas indicações é o primeiro, mas mais difícil passo de aplicação da AP.

Dos níveis mais elevados, por decomposição conjunta dos RFs e PPs, desenvolve-se uma estrutura hierárquica, arborescente, nos domínios funcional e físico, até atingir-se em cada ramo uma definição compatível com o projecto pretendido. Os elementos dos diversos níveis inferiores de cada ramo, designados por “folhas”, permitem a realização do projecto.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Como já indicado, o Projecto é realizado em ziguezague entre os domínios funcionais e físicos, processo que é ilustrado na Figura 2.2. Nesta figura, os RFs e os PPs são representados por caixas, em que estão interligados os diversos níveis de decomposição. O processo de passagem do domínio físico para o funcional é representado por uma seta a cheio.

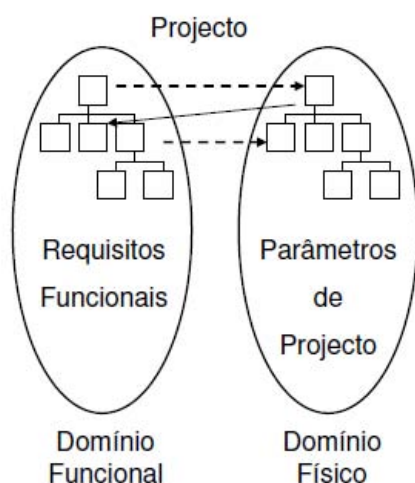


Figura 2.2. Projecto na AP

No processo de escolha dos PPs interferem processos psicológicos, éticos e culturais; legislação, normas e códigos; conhecimentos de sistemas, de equipamentos e de mercado. Equipas diferentes farão escolhas de PPs diferentes, consoante os seus conhecimentos e a sua capacidade imaginativa. Por vezes, a definição das características do projecto e dos PPs é apenas uma questão de terminologia, sendo necessário utilizar métodos de descodificação dessa linguagem [2.3].

Grupos de sistemas com aplicações semelhantes têm funções de nível elevado iguais, pelo menos nos níveis mais elevados da decomposição. Diremos que nestes casos existe repetibilidade funcional, mesmo que os parâmetros físicos sejam substancialmente diferentes.

Esta repetibilidade expressa-se, por exemplo, na decomposição das funções dos sistemas de climatização. Até determinado nível os RFs são iguais, independentemente do sistema utilizado. A este facto não será alheia alguma convergência de normas e códigos da Europa e dos E.U.A. .

2.3.2 Constrangimentos

No contexto da AP, os constrangimentos (CSs) representam os limites de uma solução aceitável. Existem dois tipos de constrangimentos: constrangimentos de especificação e constrangimentos de sistema [Cap 2, 2.1]. Os constrangimentos de especificação são as balizas que enquadram o produto final, normalmente peso, preço, dimensões, etc. Por exemplo, o constrangimento de “dimensão máxima das condutas”, pode eliminar a possibilidade de utilização de alguns tipos de sistemas.

Os constrangimentos de sistema determinam-se pelas interfaces entre sistemas ou entre componentes, sendo relativas a dimensões, à capacidade dos equipamentos ou às leis da natureza: por exemplo, a escolha de um caudal de ar novo determina constrangimentos dimensionais nas unidades de tratamento de ar.

Teoria Axiomática de Projecto

Na teoria da Análise do Valor (AV), os constrangimentos são considerados restrições na escolha de soluções. Estes podem ser determinadas por leis, normas, exigências de mercado, política da organização, recursos, etc. [Glossário, 2.4]. Com expressão equivalente na AP, representam baias no processo de mapeamento entre os domínios funcional e físico.

Por vezes, a diferença entre CSs e RFs é ténue. Um determinado RF pode ser, no contexto de um outro projecto, um CS. Por exemplo, o custo é normalmente um constrangimento de especificação, mas pode ser considerado uma função [2.5]. A diferença formal na AP entre CSs e RFs reside no facto de existirem tolerâncias para os RFs, que têm de ser controladas, e de estes necessitarem de PPs que os concretizem. Um CS é comum a todo o projecto, servindo como critério da sua avaliação final.

Um exemplo dessa alteração ontológica entre CSs e RFs ocorre com a função “controlar a massa de partículas em suspensão no ar” num laboratório. Neste contexto é um RF. Se considerarmos o contexto da climatização de um escritório, percebemos que se trata de um CS, dado não haver necessidade de um PP que o controle directamente.

2.4 Equação de Projecto

A equação de projecto determina “o que se pretende alcançar”, face a “como se pretende alcançar”, ou seja, relaciona os PPs no domínio físico e os RFs no domínio funcional. A sua relação é definida pela função:

$$\{RF\} = [A] \cdot \{PP\} \quad (2.2)$$

Onde $\{RF\}$ e $\{PP\}$ são vectores e $[A]$ a matriz de projecto. Esta matriz terá elementos significativos nas células que relacionam um determinado PP com um RF. Estes elementos podem ser representados por valores, funções, relações vagas ou, de forma mais geral, apenas pela marcação de um “X”. É usual utilizar um “X” se um PP tiver um efeito importante no RF respectivo e um “x” se o efeito for pequeno. O zero, ou um espaço em branco, indicam efeitos nulos ou desprezáveis no contexto do projecto [Cap 3, 2.1], que podem mesmo ocorrer por se assumirem relações fixas entre os PPs.

Frequentemente, as relações matemáticas entre $\{PP\}$ e $\{RF\}$ não estão formuladas. Assim, a marcação de elementos na matriz de projecto tem sempre algum grau de subjectividade, especialmente nos níveis mais elevados da decomposição. Muitas vezes, os PPs de nível mais elevado não são conhecidos ou não têm designação, sendo descritos, relativamente aos RFs, como o “sistema que faz o RFX”, ou simplesmente como “sistema”.

Em termos conceptuais, anteriores à realização do Projecto, a equação de projecto não existe, pelo que a existência dos domínios não determina o universo de cada parâmetro, do

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

mesmo modo que, nas funções matemáticas, a existência de Domínios e Contradomínios não determina uma função. Do mesmo modo, na equação de projecto, só após a escolha do universo de cada PP é possível formular a equação (2.2).

Ao nível das “folhas” será possível estabelecer funções físicas entre PPs e RFs, no intervalo de utilização em projecto. Então, é possível reescrever a equação de projecto utilizando a inversa da matriz de projecto: $\{PP\} = [A]^{-1} \cdot \{RF\}$. A equação (2.2) mostra que a matriz $[A]$ representa as taxas de variação dos RFs face às variações dos PPs, ou seja, $[A]_{PP}$ representa as variações paramétricas dos RFs face às variações dos PPs. De outro modo, $[A] = \left[\frac{\partial RF}{\partial PP} \right]$ é a matriz Jacobiana da aplicação.

No caso de a equação de projecto ser linear, a matriz de projecto tem coeficientes constantes em qualquer ponto do domínio dos PPs.

Num projecto ideal, a variação de um PP deve afectar apenas o respectivo RF, pelo que o número de PPs deve ser igual ao número de RFs e a matriz de projecto é diagonal. Sem perda de generalidade, apresenta-se uma equação com uma matriz de projecto (3x3):

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \\ RF_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & & \\ & a_{22} & \\ & & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Nesta situação, designa-se o projecto por independente ou desacoplado. Se $[A]$ puder ser expressa algebricamente, a inversa da matriz de projecto é simples de obter e reflecte a relação directa entre cada par RF-PP. Sempre que possível, a escolha da solução de projecto deve recair num projecto independente.

Se A for triangular superior ou inferior, há uma ordem precisa de atribuição de valores aos PPs, para que se possam alcançar os RFs desejados com o mínimo de alterações. No exemplo da equação (2.4), a ordem de ajuste dos PPs deverá ser: PP_1 e depois PP_2 ou PP_3 . Este tipo de projecto designa-se por desacoplável.

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \\ RF_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & & \\ a_{21} & a_{22} & \\ a_{31} & & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Numa situação de um projecto desacoplável, caso se desconheça a matriz de projecto, o utilizador pode ser levado a experimentar várias sequências de ajuste de PPs, até determinar a sequência correcta.

Teoria Axiomática de Projecto

É o tipo de matriz que caracteriza projectos com sequências de operações, nomeadamente processos de fabrico ou métodos de cálculo. Existindo n PPs, $n!$ é o número de hipóteses de actuação nos n RFs. Numa matriz triangular com todos os elementos inferiores (ou superiores) significativos, só existe uma sequência possível, pelo que a probabilidade de acertar é de $1/n!$ No exemplo dado, a probabilidade seria de $2/3!$

Finalmente, se A tem elementos significativos em ambos os lados da diagonal, o projecto é acoplado.

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \\ RF_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & \\ a_{31} & & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_3 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Note-se que apenas as “folhas” têm consequências directas no funcionamento do sistema, ou equipamento. No entanto, um acoplamento a nível superior implica sempre a existência de pelo menos outro acoplamento a nível inferior. A identificação de acoplamentos a nível superior funciona como alerta ao futuro funcionamento do sistema.

Quando acoplados, os sistemas poderão funcionar em estados pré-determinados, mas qualquer variação num PP terá consequências em diversos RFs. Em consequência e reciprocamente, a fixação de um ou mais PPs permite transformar um projecto acoplado num desacoplável ou mesmo num projecto independente.

O ajuste dos PPs para realizar os RFs, e portanto a resolução da equação de projecto, é realizado na fase de projecto. Daqui, pode supor-se que um projecto possa ser acoplado desde que em cada momento seja resolvida a equação de projecto. No entanto, devido a reajustes de operação, eventualmente por desgaste ou por alterações das condições da envolvente ou dos requisitos do sistema, tanto os PPs como os RFs podem variar. Nestas situações, os projectos acoplados passam a funcionar mal.

O reajuste dos PPs, no novo estado, exige que se resolva a função inversa da equação de projecto. Para além da eventual dificuldade da resolução, em situações em que a equação é definida de modo impreciso, é necessário que exista solução no universo de definição dos PPs.

Devido à possibilidade de variação de alguns RFs durante o funcionamento do sistema, alguns PPs são projectados de modo a poderem ser alterados. Os restantes permanecem fixos após a realização física do sistema. No ponto seguinte, designar-se-á por tolerância o intervalo aceitável de variação dos PPs tornados fixos. No entanto, a avaliação efectuada é também aplicável à gama de funcionamento dos PPs tornados variáveis.

2.5 Acoplamentos

Se na fase de projecto ou de funcionamento do sistema forem identificados acoplamentos, compreende-se quais os RFs afectados e quais os PPs intervenientes. Este diagnóstico da situação permite levantar possíveis soluções para a resolução do problema.

Sempre que possível, todas as dependências que originem projectos acoplados ou desacopláveis devem ser evitados. No entanto, alguns sistemas são desacopláveis pela natureza física dos fenómenos, ou pela necessidade sequencial do processo. Um processo de desumidificação de um fluxo de ar com controlo de temperatura exige o arrefecimento do ar seguido do seu reaquecimento. Nesta situação, a função de aquecimento tem de ser realizada por imposição física, posteriormente ao arrefecimento, gerando um projecto desacoplável.

Neste parágrafo, interessa analisar os acoplamentos que são inerentes à concepção do sistema, os quais podem ser evitados na fase de projecto. Existem acoplamentos entre RFs, entre PPs e RFs e entre PPs [2.6].

O acoplamento entre RFs ocorre se para o projecto forem escolhidos requisitos dependentes entre si. A avaliação da independência dos RFs pode ser feita por matrizes com as relações (RFxRF). Esta matriz deve ser uma diagonal. É necessário distinguir as situações em que se confunde um RF com um CS. Neste caso, pode supor-se que dois RFs interagem quando na realidade um dos requisitos interage com um CS. Se na matriz (RFxRF) ocorrer uma coluna ou uma linha geralmente significativa, o RF correspondente será provavelmente um CS.

Outras situações de acoplamento por má formulação do problema ocorrem se o RF filho for colocado no mesmo nível do RF pai. Cria-se em projecto uma interacção que realmente não existe. Noutras situações, um RF tem um único filho, pelo que o RF filho deve ser integrado no RF pai. Por vezes, esta situação surge por se assumir uma decomposição incompleta.

O acoplamento entre PPs e RFs ocorre sempre que um PP escolhido para cumprir um RF interfere com outra função existente, como descrito no exemplo da equação (2.5). Finalmente, o acoplamento entre dois PPs pode ocorrer quando estes são fisicamente integrados, criando-se interferências na interface de ambos. As interferências originadas entre PPs implicam sempre interferências entre PPs e RFs. As situações de acoplamentos entre PPs e RFs serão descritas com maior detalhe no parágrafo seguinte.

2.5.1 Consequências do Axioma 1

Quando um PP é utilizado para satisfazer dois RFs ao mesmo tempo, ocorre um acoplamento, por número insuficiente de PPs. Esta situação pode ser representada por uma matriz de projecto não quadrada, como expressa no exemplo seguinte:

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \\ RF_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ & a_{21} \\ a_{31} & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Desta equação sobressai que, se o número de PPs for inferior ao número de RFs, o projecto é acoplado, ou algum RF não pode ser satisfeito (Teorema 1). A situação de um RF não ser satisfeito ocorre no exemplo dado para o caso de a_{31} ser nulo.

Na situação descrita pela equação (2.6), o projecto pode ser desacoplado utilizando um novo PP, desde que as novas relações existentes originem uma matriz de projecto diagonal ou triangular (Teorema 2).

Se o número de RFs for inferior ao número de PPs, o projecto é acoplado ou redundante (Teorema 3), devendo um projecto ideal ter igual número de RF e de PP (Teorema 4). Se um novo RFs for adicionado a um conjunto de PPs, ou se um novo conjunto de RFs for adicionado ou alterado, os PPs existentes não irão satisfazer os novos RFs (Teorema 5). [Cap 3, 2.1]. Um novo projecto deve ser tentado, podendo passar pela adição de novos PPs ou pela alteração do conjunto de PPs.

Este último teorema tem uma aplicação importante no Projecto de Sistemas de Climatização. No final da década de 1970, as crises energéticas ditaram a estanqueidade dos edifícios e a redução dos caudais de ar novo. Como consequência, surgiram diversos casos de doenças nos ocupantes, apelidadas globalmente por “síndrome do edifício doente”. Como forma de solucionar este problema, nos anos 80 foi-se acrescentado aos sistemas de climatização a função relativa à qualidade do ar. Os sistemas deviam manter o conforto térmico, garantindo a qualidade do ar. Muitos projectistas e fabricantes anunciaram a resolução do problema aumentando o caudal de ar novo introduzido no edifício. No entanto, em alguns casos, como é exemplo o sistema VAV, este aumento foi realizado, sem que se procedesse à revisão de todo o sistema. Muitas alterações ao sistema e novas estratégias de controlo tiveram de ser introduzidos neste sistema, para que pudesse funcionar correctamente em aplicações determinadas.

2.5.2 Representação gráfica da equação de projecto

Por facilidade de representação gráfica, considere-se a equação de projecto com apenas duas variáveis. Os RFs, sendo independentes, serão representados num conjunto de eixos ortogonais. Considere-se o caso particular de uma matriz de projecto com coeficientes constantes.

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \\ & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Se o projecto for independente, apenas a_{11} e a_{22} serão significativos, pelo que para um valor constante de cada PP, obtém-se rectas paralelas aos eixos das abcissas ou ordenadas (Graf. a), Figura 2.3). Assim, para o valor nulo de cada PP, a recta coincidirá com os eixos coordenados. Na figura, os eixos dos RFs e dos PPs são apresentados em separado para facilidade de leitura. A adaptação do sistema do estado A para um estado C pode ser feita autonomamente pelos caminhos A-B-C, ou A-D-C.

Se a matriz de projecto for triangular superior, as linhas no espaço dos RFs a PP_2 constante serão horizontais e as linhas a PP_1 constante, rectas oblíquas de inclinação a_{22}/a_{12} .

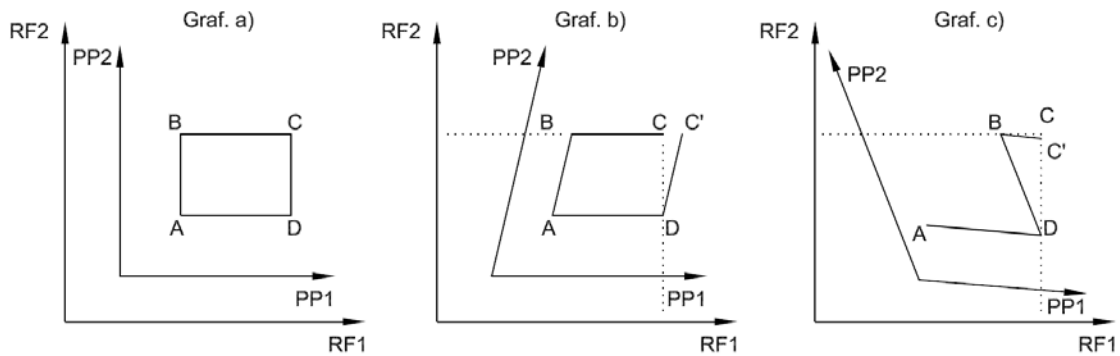


Figura 2.3. Representação gráfica do processo de mapeamento

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Assim, o eixo PP_1 será horizontal e o eixo PP_2 , oblíquo. O ajuste dos PPs indicado pela equação (2.8) é representado no Graf. b) da Figura 2.3.

Teoria Axiomática de Projecto

A passagem do estado A ao estado C deve ser feita pelo caminho A-B-C. Se RF_1 for alcançado primeiro, passando o sistema ao estado D, o ajuste de PP_2 com vista a alcançar RF_2 , leva o sistema ao estado C' , diferente de C.

Finalmente, se o sistema for acoplado, as linhas a PP_1 e a PP_2 constante serão oblíquas e para alcançar-se o estado C serão necessárias múltiplas iterações do sistema. Os eixos PP_1 e PP_2 serão oblíquos no espaço dos RFs, sendo ortogonais entre si para o caso particular da matriz de projecto ser um operador de rotação.

Um sistema será independente se os eixos dos PPs no espaço RF forem ortogonais entre si e ortogonais aos eixos dos RFs. A equação de projecto poderá ser reescrita na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{bmatrix} \cdot PP_1 + \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{bmatrix} \cdot PP_2 \quad (2.9)$$

Ou seja, para cada PP constante, os RFs alcançados dependem dos vectores coluna $VC_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{bmatrix}$ e $VC_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{bmatrix}$. Aplicando o produto interno facilmente se obtém os ângulos entre eles. Uma medida da independência é a reangularidade, Rg , dada pelo produtório dos senos dos ângulos entre os eixos dos PPs. Para uma matriz de dimensão n , Rg será expressa por:

$$Rg = \prod_{\substack{i=1, n-1 \\ j=i+1, n}} \sqrt{1 - \left(\frac{VC_i \cdot VC_j}{\|VC_i\| \cdot \|VC_j\|} \right)^2} \quad (2.10)$$

Para que um projecto seja independente, é condição necessária que R seja a unidade. Se, para além do mais, os eixos PP forem ortogonais aos eixos RF, o projecto será independente. A semangularidade, Sg , é uma medida da ortogonalidade referida, dada pelo produtório dos senos dos ângulos entre os eixos PP e os RF. Sendo e_j um qualquer versor do espaço RF, Sg é obtido de:

$$Sg = \prod_{\substack{i=1, n \\ j=1, n}} \sqrt{1 - \left(\frac{VC_i \cdot e_j}{\|VC_i\|} \right)^2} \quad (2.11)$$

2.5.3 Tolerâncias

A matriz de projecto tem importância decisiva na tolerância admissível para os PPs. Por facilidade de representação gráfica, considere-se novamente um projecto com dois RF e dois PPs, com coeficientes constantes na matriz de projecto. Esta equação pode ser entendida como uma mudança entre espaços, representados pelo domínio físico e funcional. Num projecto independente, as variações nos PPs e Δ PPs influenciarão variações nos RFs e Δ RFs, de acordo com a expressão:

$$\begin{bmatrix} \Delta RF_1 \\ \Delta RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \\ & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta PP_1 \\ \Delta PP_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

As variações referidas podem ser encaradas como alterações desejadas no estado do sistema, dentro da sua gama de funcionamento, ou como variações inusitadas nos PPs.

Na equação (2.12) foram considerados significativos os elementos da diagonal principal, que reflectem as variações num RF_i devido à variação ocorrida num PP_i . Muito embora os elementos fora da diagonal fossem considerados nulos, é possível que alguns destes elementos sejam significativos, representando efeitos menores de diversos PP_j nos RF_i , para ($j \neq i$). Estes efeitos podem ser desprezados se $|a_{ii}| \gg |a_{ij}|_{(j \neq i)}$, ou seja, desde que a diagonal principal seja dominante. A tolerância de cada RF_i dependerá da variação imposta pela tolerância do respectivo PP_i e pelas tolerâncias dos restantes PP_j . Seja a primeira designada por ΔRF_{i0} e a segunda por δRF_i de modo que, $\Delta RF_i = \Delta RF_{i0} + \delta RF_i$, então o projecto é considerado independente, desde que (Teorema 8) [Cap.4, 2.1].

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_{ij} \Delta PP_j \leq \delta RF_i \quad (2.13)$$

Nesta situação, é válida a equação (2.12).

Num projecto independente, a tolerância de cada RF e ΔRF_i é dada por $a_{ii} \cdot \Delta PP_i$, ou a tolerância de cada PP_i é amplificada pelo factor a_{ii} . Assim, para uma determinada tolerância ΔRF_i , o valor de ΔPP_i será tanto menor quanto maior for a_{ii} . Havendo vantagens na escolha de PP com tolerâncias elevadas, se existirem duas possibilidades de PPs que possam cumprir um desejado RF, deve ser escolhido aquele cujo elemento a_{ii} na matriz de projecto tiver menor módulo. Esta é a dificuldade de um projecto independente: a diagonal deve ser dominante e, ter ao mesmo tempo valores a_{ii} pequenos.

Teoria Axiomática de Projecto

Na Figura 2.4, Graf.a) representa-se, para um projecto independente, as tolerâncias dos PPs e dos RFs centradas nas respectivas origens de eixos ortogonais.

Já num projecto desacoplável, a relação entre tolerâncias é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta RF_1 \\ \Delta RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta PP_1 \\ \Delta PP_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Ou seja, para os mesmos valores de tolerâncias dos RF indicados para um projecto

independente, a tolerância de PP_2 deve ser inferior, dado que $\Delta RF_2 = a_{21} \Delta PP_1 + a_{22} \Delta PP_2$ (Graf.b)).

Neste caso, verifica-se que, para a mesma tolerância de PP_1 , a região de variação incondicional de PP_2 é mais limitada. Dependendo da matriz de projecto, esta região pode ser nula, caso em que as tolerâncias dos PPs ainda não escolhidos dependerão das escolhas dos PPs anteriores já efectuadas. Ou, dito de outro modo, a probabilidade de os RF serem mantidos nas tolerâncias de projecto é menor num projecto desacoplável do que num projecto independente [Apêndice 3C, 2.2]. Esta probabilidade será geralmente ainda menor num projecto acoplado.

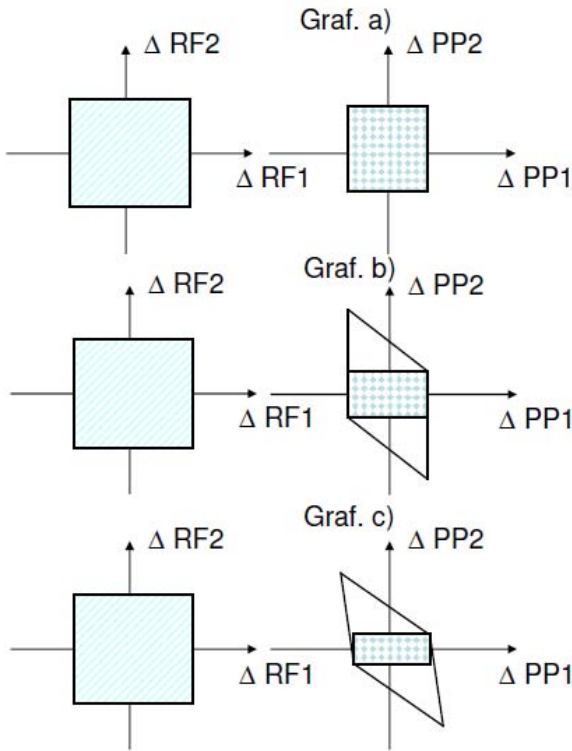


Figura 2.4. Tolerâncias de PP e RF

Se se escolherem certos PPs com tolerâncias dadas, as tolerâncias resultantes para os RFs terão de ser maiores num projecto acoplado do que num projecto independente ou desacoplável, conforme se verifica pela equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta RF_1 \\ \Delta RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta PP_1 \\ \Delta PP_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

A variação no espaço ΔRF e ΔPP é ilustrada na Figura 2.4, Graf. c), na qual o espaço de variação incondicional dos PPs é mais reduzido que nos casos anteriores.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Na produção de séries de equipamentos a partir de projectos acoplados, pode não ser possível definir limites independentes de aceitação dos PPs, que garantam sempre que os equipamentos produzidos cumprem sempre os RFs para que foram projectados.

Do exposto, demonstra-se que a existência de dependências nas tolerâncias dos PPs tem grande importância na probabilidade de alcançar os RFs. Neste sentido, o primeiro axioma da AP relaciona-se com o seu segundo axioma.

2.5.4 Identificação topológica das matrizes de Projecto

Num projecto com uma dezena de PPs pode ser difícil determinar se é acoplado ou desacoplável. Nestes casos, a utilização de algoritmos que identifiquem o tipo de projecto, utilizando cálculo automático, toma um papel de importância acrescida.

No Apêndice 1, apresenta-se uma descrição detalhada de um algoritmo, que aplica a teoria de grafos na identificação da topologia das matrizes. Este algoritmo permite reconhecer o tipo de matriz de projecto e identificar os elementos que acoplam o projecto, que podem, eventualmente, ser eliminados posteriormente. Mesmo em projectos desacopláveis, a possibilidade de eliminar elementos deve ser tida em conta, dado que confere ao projecto maior robustez, pois possibilita tolerâncias superiores nos PPs.

Como tal, é importante saber se a matriz de projecto corresponde a um projecto independente, desacoplável ou acoplado. Num projecto independente, com uma matriz de projecto ($n \times n$), qualquer sequência de ajuste de PPs satisfaz o projecto, pelo que existem $n!$ sequências possíveis. Pelo contrário, num projecto acoplado não existe qualquer sequência que garanta a realização do projecto. Neste caso, interessa saber que elementos podem ser eliminados, de modo a desacoplar o projecto [2.7].

A escolha de elementos a eliminar tem também interesse num projecto desacoplável, dado que a eliminação de elementos fora da diagonal não tem sempre o mesmo efeito. Num projecto desacoplável as funções devem ser cumpridas em sequência, ou seja, existe um conjunto de caminhos possíveis para a sua realização. A possibilidade do aumento do número de caminhos possíveis aumenta a probabilidade de obtenção de uma sequência correcta de variação dos PPs, permite aumentar as suas tolerâncias, ou seja, aumenta a área de variação incondicional dos PPs. Como ilustração desses efeitos, considere-se as matrizes triangulares da figura seguinte e as correspondentes sequências de obtenção dos RF, todas elas correspondentes a projectos desacopláveis.

Teoria Axiomática de Projecto

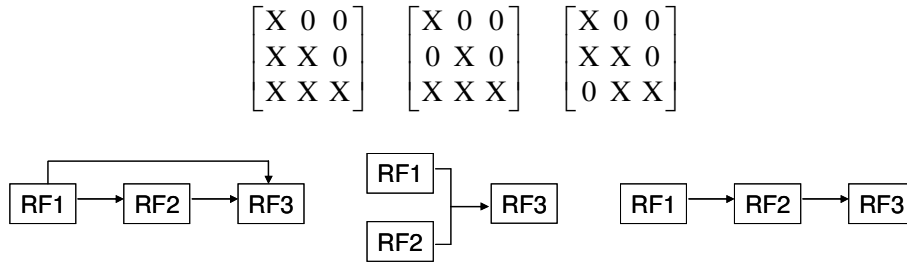


Figura 2.5. Sequências de obtenção dos RF

É interessante verificar que a sequência da matriz intermédia permite que RF_1 e RF_2 sejam escolhidos independentemente, existindo assim dois caminhos possíveis. Nas outras duas possibilidades a sequência é obrigatoriamente RF_1 , RF_2 e RF_3 .

Pela aplicação da teoria de grafos é possível determinar que caminhos existem, se o projecto é acoplado ou desacoplado, qual a renumeração de nós que mostra uma matriz de projecto na forma triangular ou que relações devem ser eliminadas. Qualquer das sequências pictóricas da Figura 2.5 pode ser associada a um grafo direccionado.

A matriz de projecto indica as relações entre RFs. Se cada RF constituir um nó de um grafo, os elementos da matriz marcados com X indicam relações entre esses nós. Se se substituírem os X por 1, obtém-se a matriz de adjacência, matriz que relaciona entre si os nós de um grafo, e que é dada pela relação [2.7]:

$$[AD] = [A]^T - [I] \quad (2.16)$$

Sendo $[I]$ a matriz identidade. $[AD]^2$ é a matriz que relaciona os nós que distam de dois saltos entre si e $[AD]^s$ a matriz que relaciona os nós que se interligam com “s” saltos. Num projecto desacoplável, a profundidade da rede é dada pelo expoente p, para a qual $[AD]^p = [0]$. Então, num projecto desacoplável, é válida a relação:

$$[AD]^n = [0] \quad (2.17)$$

Ou ainda, dado que num projecto independente ou desacoplável não há caminhos que voltem ao mesmo nó, verifica-se (2.18) onde n é a dimensão da matriz quadrada. Neste caso, a profundidade máxima da rede é n-1:

$$\bigoplus_{i=1}^n [AD]^i : \text{diag}([AD]^i) = [0] \quad (2.18)$$

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Num projecto acoplado, algum dos possíveis caminhos podem partir de um nó e retornar ao mesmo nó, pelo que a diagonal de $[AD]^i$ terá elementos significativos, ou seja:

$$[AD]^n \neq [0] \quad (2.19)$$

Nas matrizes acopladas existem ciclos. Os ciclos existentes podem ser identificados utilizando a matriz de incidência nó-troço. Obtém-se, então, a matriz dos ciclos [2.8], onde os nós presentes nos ciclos, ou em combinações lineares desses ciclos, são os RFs que acoplam o projecto.

Por facilidade de leitura do presente texto, transcreve-se para o Apêndice 1 a descrição de um programa de grafos que classifica topologicamente matrizes quadradas, identifica acoplamentos e ciclos e identifica os elementos que compõem um ciclo.

2.6 Informação e Complexidade

O segundo axioma estabelece que a informação contida num projecto deve ser mínima, isto é, entre todas as hipóteses de solução desacopláveis, a escolha deve recair na solução com menor informação. A informação contida será tanto maior quanto menor for a probabilidade de sucesso da solução. Ou de outro modo, segundo Suh, 1990: “A informação é uma medida do conhecimento necessário para satisfazer um conjunto de RFs a um determinado nível da hierarquia de RFs”. Ainda segundo o mesmo autor (2005), “a complexidade é definida como uma medida da incerteza da compreensão do que queremos conhecer, ou atingir num requisito funcional”.

No capítulo anterior foi apresentada a informação para um projecto com um único RF. Esta informação fornece uma medida da complexidade do sistema. Quanto mais informação for necessário fornecer ao sistema, maior a sua complexidade. A diferença do conceito de complexidade da AP, para outras abordagens, reside em tratar a complexidade no domínio funcional, não necessitando da abordagem directa do domínio físico [Cap 3, 2.9]. Neste aspecto difere da generalidade das abordagens sobre complexidade que tentam defini-la em função do número de peças, das interfaces existentes entre peças ou sistemas, pelo número de linhas do código de um programa, ou pelo número de páginas de um manual. Sendo a decisão tomada com base na informação necessária, é possível confrontar soluções com parâmetros físicos diferentes. A informação pode ser tomada como uma métrica de comparação entre alternativas de projecto com parâmetros diferentes [2.10].

Hilário Oh propôs uma variação ao segundo axioma, onde se pretende reduzir a variância das distribuições dos RFs [2.11].

Teoria Axiomática de Projecto

A Figura 2.6 repete alguns dos conceitos apresentados no Capítulo 1. É representado o intervalo admissível de funcionamento definido em projecto (IP) e o valor nominal de projecto (VNP).

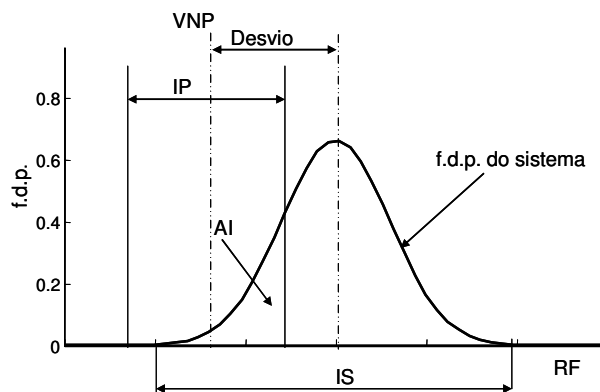


Figura 2.6. f.d.p. do sistema e valores de projecto

O intervalo de funcionamento do sistema (IS) é definido para valores fisicamente possíveis. A área de intersecção (AI) define a probabilidade de o sistema funcionar de acordo com o projectado. O desvio é a distância entre o VNP e a média da f.d.p., ou outra medida central escolhida, sendo uma medida do afastamento do comportamento do sistema ao projectado.

Sendo “a complexidade uma medida da incerteza em atingir os RFs, a complexidade é função da relação entre o intervalo admissível em projecto e o intervalo de funcionamento do sistema” (Suh, 2005). A complexidade será nula se o IS estiver sempre incluído no IP.

Qualquer dos intervalos referidos poderá variar ao longo do tempo: o IP pode variar devido a alterações externas ao sistema; o IS pode variar em consequência de alterações impostas ao sistema, nomeadamente por depreciação do seu funcionamento. Em qualquer dos casos, a AI poderá diminuir, aumentando a complexidade do sistema. Este tipo de complexidade designa-se por complexidade dependente do tempo.

Um exemplo comum no AVAC ocorre em sistemas que só podem estar em modo de arrefecimento ou só em modo de aquecimento, em cada momento. Se numa estação intermédia, o sistema estiver em modo de arrefecimento, mas alguns espaços necessitarem de aquecimento, então o IS está totalmente fora do IP nesses espaços e a informação é infinita. O IS manteve-se, mas o IP foi alterado devido a modificações externas ao sistema. Um projecto diz-se robusto se os RFs puderem ser satisfeitos, independentemente das variações que possam ocorrer nos PPs.

Face ao apresentado nos parágrafos anteriores, um projecto robusto deve definir a máxima tolerância possível para os RFs. Deve ser independente, ou seja, depender apenas da diagonal principal da matriz de projecto, dentro das condições de tolerância estabelecidas. Deve ainda ter desvio nulo para cada RF, ou seja, a medida central da f.d.p.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

deve coincidir com o VNP e, se existirem alternativas de escolha de PPs, devem ser escolhidos os que tiverem menor variância. Finalmente, às variações nos PPs não devem corresponder amplificações nas variações dos RFs, ou, de outro modo, os elementos da diagonal principal da matriz de projecto devem ser em módulo tão reduzidos quanto possível. [Cap.2, 2.9].

Veremos nos parágrafos seguintes a aplicação do conceito de informação a projectos independentes, desacopláveis e acoplados.

2.6.1 Informação de projectos independentes

A informação de um único RF foi definida no Capítulo 1 como a probabilidade de sucesso do sistema, calculada a partir da AI por:

$$I = \log_2\left(\frac{1}{AI}\right) \quad (2.20)$$

Num projecto com n requisitos funcionais independentes, a probabilidade conjunta de sucesso P será o produto das probabilidades individuais de sucesso de cada um dos requisitos, p_i , pelo que a informação de todo o sistema será dada pela soma das informações de cada função.

$$I = -\log_2(P) = -\log\left(\prod_i p_i\right) = \sum_i (-\log_2(p_i)) = \sum_i I_i \quad (2.21)$$

Da equação anterior, conclui-se que a sequência de ajustamento dos PPs para satisfazer os RFs não interfere no valor da informação de uma solução independente (Teorema 6).

2.6.2 Informação de projectos desacopláveis

Genericamente, a informação de um qualquer sistema é obtida da probabilidade de sucesso, utilizando a equação (2.20), pela integração da f.d.p. conjunta dos diversos RF em todo o espaço de projecto IP_n .

$$p = \int_{IP_n} f.d.p.(RF_1, RF_2, \dots, RF_n) \cdot dRF_1 \cdot dRF_2 \dots dRF_n \quad (2.22)$$

Num projecto desacoplado, os RFs não são independentes e a informação não pode ser simplesmente somada. A probabilidade de sucesso de cada RF depende do estado de satisfação dos outros, ou de outro modo a sua informação depende da sequência pela qual os PPs são ajustados (Teorema 7).

Teoria Axiomática de Projecto

Normalmente, mas nem sempre, a informação de um sistema acoplado é superior à de um sistema não acoplado.

O integral referido é calculado no espaço dos RFs em função das tolerâncias consideradas para os PPs. Daniel D. Frey apresenta o cálculo da informação em projectos desacopláveis, para o caso de uma f.d.p. uniformemente distribuída e para matrizes de projecto lineares. Nesta situação, a probabilidade depende do volume interno a um poliedro convexo [2.12].

Gwang-Sub Shin, 2004, [2.13], define a probabilidade de sucesso a partir da transformação para o espaço físico. Num projecto desacoplado, conhecida a sequência correcta de actuação nos PPs, as tolerâncias ΔPP são obtidas directamente das tolerâncias de projecto estabelecidas para os RFs.

A informação pode ser obtida no espaço físico, por transformação da equação (2.22). A probabilidade de sucesso pode ser integrada no espaço dos PPs, num domínio $IP_n^*(PP)$. Na equação (2.23), “fdp” representa a f.d.p. em ordem aos PPs e $|J|$ o Jacobiano da transformação do espaço dos RFs para o espaço dos PPs.

$$p = \int_{IP_n^*(PP)} fdp(PP_1, PP_2, \dots, PP_n) \cdot |J| \cdot dPP_1 \cdot dPP_2 \dots dPP_n \quad (2.23)$$

Considere-se o caso mais simples do cálculo de probabilidade de sucesso num espaço com duas variáveis, utilizando a matriz de projecto da equação (2.14) com coeficientes constantes. Seja ainda o domínio de integração no espaço dos RFs dado em torno de (RF_{10}, RF_{20}) com tolerâncias centradas de $\pm \Delta RF_1$ e $\pm \Delta RF_2$. O domínio de integração, IP_2 , no espaço dos PPs será:

$$IP_2 = \left\{ (PP_1, PP_2) : \frac{RF_{10} - \Delta RF_1}{a_{11}} < PP_1 < \frac{RF_{10} + \Delta RF_1}{a_{11}}, \right. \\ \left. \frac{(RF_{20} - \Delta RF_2) - a_{21}(PP_1 - \Delta RF_1 / a_{11})}{a_{22}} < PP_2 < \frac{(RF_{20} + \Delta RF_2) - a_{21}(PP_1 + \Delta RF_1 / a_{11})}{a_{22}} \right\} \quad (2.24)$$

Sendo o Jacobiano da transformação calculado do domínio dos RFs para o domínio dos PPs igual à matriz de projecto A , a probabilidade de sucesso é definida por:

$$p = \iint_{IP_2} fdp(PP_1, PP_2) \cdot |A| \cdot dPP_1 \cdot dPP_2 \quad (2.25)$$

A determinação da informação pode não ser possível por desconhecimento da f.d.p. associada aos RF. Uma possibilidade de solução é a utilização de uma f.d.p. uniforme no IS.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Noutros casos, a natureza física do fenómeno poderá ditar o tipo de distribuição, nomeadamente a multinormal.

Na generalidade das situações, o projecto é realizado sem o conhecimento completo de todas as consequências de escolha dos PPs em cada nível de decomposição. Mesmo na fase final do projecto, algumas influências podem apenas ser expressas de modo vago, quer indicando-se tendências de aumento ou de redução, quer identificando-se efeitos cruzados entre parâmetros e classificações qualitativas das soluções encontradas. Ou seja, a f.d.p. pode algumas vezes ser apenas estimada, não podendo ser quantificada.

Apresenta-se no parágrafo 2.6.4 dois métodos, utilizados para estimativa da f.d.p.: a utilização de conjuntos vagos e o método de Dempster.

2.6.3 Teoremas e corolários

Dos axiomas referidos no parágrafo 2.2 é possível retirar corolários [Cap. 3, 2.1] e diversos teoremas derivados, aplicados ao projecto em geral, à decomposição de grandes sistemas, ao desenvolvimento de *software*, à complexidade e ao projecto de grandes organizações [2.9]. Os teoremas de maior interesse foram apresentados nos parágrafos anteriores (2.6.1 e 2.6.2). No Anexo, é apresentada a lista de todos os corolários e teoremas aplicados ao projecto mecânico.

2.6.4 Estimativas da função densidade de probabilidade

A f.d.p. pode ser estimada com base no conhecimento do fenómeno e conhecidos os necessários estimadores estatísticos.

Utilizando a teoria da informação, é possível determinar a f.d.p. de uma variável aleatória discreta, conhecidos os valores esperados de um sistema em k situações, por maximização da entropia do sistema. Basem El-Haik (2000) aplicou este conceito na determinação da distribuição de PPs [2.14].

A teoria de Dempster-Shafer foi utilizada por Michele Pappalardo (2006) [2.15] na escolha de sincronismos de caixas de velocidades. Esta teoria aceita atribuir uma probabilidade a um acontecimento baseado na opinião subjectiva. Definido o conjunto de hipóteses de dimensão Θ , é definido o domínio do problema Θ onde intervêm todas as combinações dos conjuntos de hipóteses, A_i . Existem portanto 2^Θ conjuntos, sendo atribuída a cada um deles uma probabilidade básica, também designada por função de massa, f.m., que satisfaz as condições: $f.m.(\emptyset) = 0$; $f.m.(H_{p_i}) \geq 0, \forall H_{p_i} \in 2^\Theta$; $\sum_i^{2^\Theta} H_{p_i} = 1$. Note-se a diferença para a teoria das probabilidades, em que o número de hipóteses possíveis é o da dimensão do espaço amostral Ω .

Teoria Axiomática de Projecto

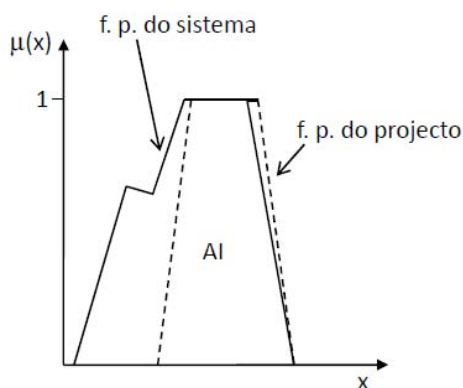
A crença, Bel, num conjunto X_p é a massa de probabilidade de todos os conjuntos contidos em X_p : $Bel(X_p) = \sum_{H_{p_i} \subseteq X_p} m(H_{p_i})$; a plausibilidade, PL, a massa de probabilidade de todos os conjuntos que intersectam X_p : $PL(X_p) = \sum_{H_{p_i} \cap X_p \neq \emptyset} m(H_{p_i})$. O intervalo entre crença e plausibilidade é designado por intervalo de crença.

A teoria de Dempster permite combinar testes independentes por um produto das massas de probabilidades corrigidas, tendo como resultado a redução do intervalo de crença. A crença é uma medida subjectiva da probabilidade de ocorrência de um acontecimento, pelo que, quando aplicada ao sucesso da satisfação de um RF por um sistema, representa a probabilidade da AI. Esta teoria tem sido utilizada em aplicações de testes de diagnóstico, uma vez que a acumulação de testes permite aumentar a crença numa causa de um problema. Pode também ser utilizada para a escolha de PPs, com base na crença de satisfação de um RF.

A utilização de conjuntos vagos como modo de desacoplar um projecto foi proposto por Naddeo (2004 e 2006) [2.16]. Nicola Cappeti, et al, (2004) [2.17] propuseram a utilização de funções de pertença utilizando a lógica vaga de Zadeh, para indicar o grau de satisfação de um RF face a um PP proposto. Esta relação é expressa pela substituição dos elementos significativos da matriz de projecto, por funções de pertença, com o objectivo de avaliar a que valores de corte α o projecto é independente.

A utilização de conjuntos vagos permite o cálculo da informação a partir da intersecção entre a função de pertença (f.p.) que espelha o intervalo de projecto e a que espelha o funcionamento do sistema [2.18]. A informação de um único RF, utilizando conjuntos vagos,

é calculada de acordo com a Figura 2.7, sendo AI a área de intersecção, ou área comum, entre a função de pertença do sistema e a do projecto:



$$I = \log_2 \left(\frac{\text{Área do sistema}}{\text{Área de intersecção}} \right) \quad (2.26)$$

Figura 2.7. Função de pertença do sistema e do projecto

No caso de um projecto independente com vários RFs, a informação do sistema é calculada pelo somatório das informações. Numa variação ao método exposto, propusemos

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

(2006) [2.19] uma regra de implicação definida de um conjunto de PP para um RF, para os quais foram definidas as respectivas f.p.

Nesta abordagem aos conjuntos vagos, utilizaremos a designação de conjuntos graduados, de acordo com a nomenclatura de António Aniceto Monteiro¹. Assim usaremos a terminologia de “graduar conjuntos²” para o processo de associar uma pertença a cada valor de um conjunto.

A determinação da informação associada a um valor determinado ³ do PP é realizada pelo mesmo método utilizado na simulação com conjuntos vagos:

- Graduar os PPs, obtendo uma colecção de conjuntos vagos com as classes de soluções;
- Graduar os RFs, obtendo uma colecção de conjuntos vagos com as classes de soluções;
- Definir uma regra de implicação entre os PPs e os RFs, que possa expressar as relações entre os PPs e os RFs. Esta regra pode mesmo ser formulada entre PPs de um nível e RFs de um nível superior;
- Para um valor determinado de PP obter as f.p. consequentes, utilizando um operador de implicação, por exemplo o operador de produto de Larson;
- Agregar os consequentes e definir a f.p. do RF;
- Intersectar a f.p do RF com a f.p. do intervalo de projecto e calcular a informação utilizando a equação (2.26).

Note-se que o integral da f.p. não é necessariamente unitário, ao contrário da f.d.p. Logo, não são comparáveis os valores das áreas delimitadas pelas f.p. de diferentes PPs. No entanto, a informação define-se por uma razão de áreas, que são delimitadas pela f.p., o que permite a comparação entre valores de informação.

No Apêndice 2 apresenta-se um pequeno resumo da teoria de conjuntos vagos.

¹ “À memória de Aureliano de Mira Fernandes, Conjuntos Graduados de Zadeh”, António Aniceto Monteiro, Técnica 449/450, Ano LIII, Volume XL, 1978

² “Fuzzify” na literatura anglo-saxónica

³ “Crisp” na literatura anglo-saxónica

2.6.5 Complexidade

Como referido nos parágrafos anteriores, quanto maior for a informação necessária ao funcionamento do sistema, maior a sua complexidade. Esta complexidade é designada por complexidade real C_R , e é definida pela própria informação do sistema:

$$C_R = I \quad (2.27)$$

Como analisámos anteriormente, em projectos desacopláveis a sequência de operações é importante. O desconhecimento desta sequência por ignorância do fenómeno físico e/ou do equipamento, pode levar a tentativas falhadas de colocação do equipamento em funcionamento. Esta complexidade, que depende do conhecimento da matriz de projecto, designa-se por complexidade imaginária C_{Im} e ocorre apenas em projectos desacopláveis. Nestes projectos se existirem n RFs, existirão $n!$ permutações possíveis, ou seja, $n!$ sequências possíveis. Se existirem m possibilidades de sequências com êxito, a probabilidade de sucesso numa escolha aleatória é de $m/n!$, pelo que a complexidade imaginária será:

$$C_{Im} = \log_2 \left(\frac{n!}{m} \right) \quad (2.28)$$

Para além destes dois tipos de complexidade, pode haver desvios entre a f.d.p. e o IS por variações de ambos ao longo do tempo. Designa-se esta complexidade por complexidade dependente do tempo. Esta pode aumentar indefinidamente, consoante as variações combinatórias dos IPs e ISs dos diversos RFs, ou ser periodicamente reiniciada. O primeiro caso designa-se por complexidade combinatória; o segundo por complexidade periódica.

Assim, a complexidade pode ser real, função da informação I necessária ao sistema; imaginária, que decorre do desconhecimento das sequências de operações nos projectos desacoplados; e dependente do tempo, caso em que a complexidade pode ser combinatória ou periódica.

Sempre que possível, um sistema com complexidade dependente do tempo deve ser projectado de modo a ter complexidade periódica [2.20]. De notar que a periodicidade, embora ocorra ao longo do tempo, não tem necessariamente de ser temporal. Pode ser geométrica, química, térmica, biológica, etc., desde que em algum momento o sistema retorne à definição inicial de um estado de referência.

2.7 Teoria Axiomática de Projecto e Métodos em Projecto

Entre o exposto neste capítulo sobre a AP e os métodos e teorias de Projecto apresentados no Capítulo 1, facilmente se identificam várias relações. Existem relações descritas com o QFD, a AV, o método de DSM e o método de Taguchi, o que permite, segundo alguns autores, construir uma metodologia onde intervenham em conjunto diversas destas teorias, metodologias ou métodos. Nos pontos seguintes, indica-se algumas das relações apresentadas com maior interesse.

2.7.1 Teoria Axiomática de Projecto e TRIZ

A existência de contradições no TRIZ ocorre quando a actuação num parâmetro beneficia uma função em detrimento de outra. Esta situação é análoga à que ocorre quando o projecto é acoplado, pelo que os princípios utilizados para a resolução das contradições no TRIZ podem servir como princípios para desacoplar um projecto. Gwan-Seob Shin e Gyung-Jin Park (2006) [2.21] propuseram seis padrões de matrizes com acoplamentos e respectivas soluções utilizando o TRIZ. Têm especial interesse os padrões de acoplamento relativos a contradições tecnológicas e a contradições físicas. Para a resolução de contradições técnicas prevê-se a utilização da tabela de contradições do TRIZ; para a resolução de contradições físicas, a separação de regras.

Tenhamos em conta, por exemplo, a contradição que ocorre por utilização de ar novo arrefecido, que é introduzido em diversos espaços, nos quais existe um sistema que controla a temperatura. Entre ambos pode existir uma contradição técnica, dado que um sistema pode estar a arrefecer e o outro a impor aquecimento. Aplicando as tabelas de TRIZ, o parâmetro que causa a contradição é o par de parâmetros temperatura, temperatura: na tabela de contradições o (17,17). A solução reside nos princípios inventivos 19, 32 ou 35: 19- acção periódica; 32- alteração de cores, 35- alteração de propriedades, que contempla nomeadamente a alteração do grau de flexibilidade (35-C), a mudança de temperatura (35-D) ou a alteração de outras características da técnica empregue (35-E). Para qualquer dos princípios inventivos podemos facilmente idealizar soluções.

Como exemplo de uma contradição física, pode indicar-se a utilização de um sistema que só arrefece ou só aquece (sistema a dois tubos). Pode surgir uma contradição física, porque a temperatura a que opera o sistema causa um comportamento positivo em alguns espaços, em detrimento de outros.

Para a resolução de contradições físicas Altshuller propôs, em 1970, onze métodos. Destes destacam-se os seguintes: 1- separação das propriedades que causam a

Teoria Axiomática de Projecto

contradição no espaço; 2- Separação das propriedades de contradição no tempo; 4- Mudança de um sistema para um anti-sistema; 6- Transição de um sistema para operação a nível micro. De igual modo, facilmente se identificam soluções para cada uma das soluções inventivas.

Young Ju Kang (2004) [2.22] propõe a interligação entre a AP e o TRIZ, com aplicação em situações de projecto acoplado ou desacoplável, utilizando os seguintes passos: formular o problema de projecto, desenvolvendo o processo de decomposição hierárquico e criando a matriz de projecto; identificar os acoplamentos na matriz de projecto; identificar o tipo de contradição correspondente; fazer corresponder um dos princípios inventivos do TRIZ; conceber novos PPs que tornem o projecto desacoplado.

O TRIZ é, assim, uma metodologia que pode ser integrada nas aplicações da AP ao desenvolvimento de projectos.

2.7.2 Teoria Axiomática de Projecto e DSM

A AP tem com principal preocupação o mapeamento entre os RFs e os PPs. O DSM preocupa-se com as interações e integração dos referidos PPs. No entanto, a existência de interações entre parâmetros tem consequências no desempenho dos RFs, pelo que existem semelhanças na aplicação dos dois métodos. O primeiro passo de interligação entre o AP e o DSM foi realizado por Dong e Whitney (2001).

M.D. Guenov e S.G. Barker (2004) [2.23] integraram o DSM na aplicação da AP. Para esta integração é fundamental ter em atenção o Corolário 3 da AP referente à integração física de parâmetros e o Teorema 5 relativo à necessidade de revisão do projecto por inclusão de um novo RF. O processo proposto (COPE) inicia-se com a construção da matriz de projecto proposta pela AP. As suas linhas e colunas são permutadas de modo a que os elementos da diagonal principal sejam significativos e dominantes. São estabelecidas as relações entre os PPs e caracterizados os fluxos entre eles. Em cada fase de decomposição é necessário integrar as bases de dados de conhecimento disponíveis e aplicar os constrangimentos. Este processo de decomposição deve ser efectuado desde o nível inicial até aos elementos finais da desagregação.

2.7.3 Teoria Axiomática de Projecto e QFD

O QFD tem sido utilizado em especial na avaliação das necessidades do mercado e na capacidade de um empresa produzir um bem ou serviço, de acordo com essas necessidades. Pretende-se que o produto seja percebido pelo mercado como de maior qualidade do que os da sua concorrência.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Vários autores consideram o QFD como um instrumento para definição dos RFs e PPs dos níveis mais elevados. A hierarquização dos PPs para escolha das variáveis de processo é também proposta como aplicação do QFD [2.24].

Note-se que o QFD não qualifica os projectos pela possibilidade de cumprirem os RFs, mas pela sua adaptação ao mercado. Na AP, supõe-se que qualquer RF enunciado deve ser cumprido e que o seu não cumprimento trará defeitos de funcionamento. Enquanto que nesta teoria a forma de enunciar os RFs depende do mapeamento das necessidades dos clientes, no QFD e na AV o método de definir as funções explicita as próprias necessidades.

Nestes métodos existe uma hierarquização das funções, dependente da resposta do mercado, podendo algumas ser menos bem desempenhadas. Ou seja, assume-se que, em determinadas funções, a tolerância do consumidor é maior.

2.7.4 Teoria Axiomática de Projecto e Taguchi

Vimos no capítulo anterior que o objectivo principal do método de Taguchi é a redução da relação entre sinal e ruído. A. Kerim KAR [2.25] relaciona esta relação com o conceito de informação e conclui que “minimizando o conteúdo de informação no projecto/produção significa maximizar a relação sinal/ruído descrita por Taguchi”. Esta afirmação deriva da comparação entre as distribuições de probabilidade prevista em projecto para um RF e a distribuição obtida pelo sistema, utilizando um conceito de informação próximo do utilizado na AP. Para o efeito utiliza a informação de Kullback, ou contraste entre distribuições, que é uma medida do afastamento entre distribuições. Aplica esta medida entre a distribuição pretendida para o projecto e a obtida pelo sistema, concluindo da necessidade de reduzir a variação na distribuição do sistema.

2.7.5 Teoria Axiomática de Projecto e integração de métodos de Projecto

Do apresentado neste capítulo e no anterior, identifica-se facilmente diversas ligações e semelhanças entre a AP e outros métodos e metodologias apresentados. Alguns autores têm tentado criar uma estrutura que englobe as suas particularidades numa metodologia geral de Projecto.

O processo de desenvolvimento de um projecto engloba quatro fases: recolha de informação e análise (coligir); criar; construir; produzir [2.26]. Nas quatro grandes fases propostas podem ser justapostas as etapas de diversos métodos de Projecto, aplicando-se o QFD na primeira fase, o TRIZ na segunda, a AV na fase de construção e, nas terceira e quarta fases o Projecto robusto, para a fase de produção. Vários autores têm proposto, de modo intuitivo, que a recolha de informação e análise seja efectuada com QFD, a geração de conceitos de projecto com TRIZ e a optimização de parâmetros com as técnicas de

Teoria Axiomática de Projecto

Projecto Robusto de Taguchi. Claro que existem sempre dificuldades metodológicas e de aplicação da integração destes métodos na realidade de uma empresa.

Allan L. Dickinson (2006) propõe uma integração de métodos, com o objectivo de obtenção de produtos sem falhas, que vão ao encontro das necessidades dos clientes. Este objectivo tem sido descrito pelo acrónimo DFSS (Design for Six Sigma), com metodologias diversas. O DFSS inclui métodos conhecidos, que respondem a todas as fases de um produto, desde a identificação das necessidades dos clientes à entrega do produto ou serviço que satisfaça totalmente o cliente. A estrutura do DFSS não é completamente consensual, podendo ser considerada nas fases de identificação, definição, desenvolvimento, optimização e verificação [2.27]. O QFD é integrado na fase de definição, a AP e a teoria de Pugh na fase de desenvolvimento e o PR de Taguchi como elemento de base na fase de optimização.

Outra abordagem similar é proposta por George E. Dieter (2000) [2.28], que integra os capítulos do seu livro em oito fases de desenvolvimento do produto. Estas são correspondentes à definição do problema, onde integra o QFD; obtenção de informação; levantamento de concepções, utilizando nomeadamente as técnicas de *brainstorming*; avaliação das concepções, onde inclui o método Pugh, Triz e AP; arquitectura de produto; projecto de configuração, utilizando nomeadamente a simulação; projecto de parâmetros com a utilização dos métodos de Taguchi e de análise de falhas; e projecto de detalhe, onde são definidas as especificações e telas de construção.

Todas estas abordagens utilizam métodos e metodologias comprovadas, integradas de modo intuitivo, num manifesto bom senso de utilização das melhores características de cada.

No entanto, a AP pode fornecer um quadro geral para a integração de todos os diversos métodos pela utilização dos vários domínios e do processo de mapeamento entre eles. Este processo de desenvolvimento, previsto na AP, foi proposto na década de 1990 sob a designação de engenharia concorrente. As fases de projecto de produto e projecto de fabrico são desenvolvidas transversalmente ao longo dos diversos domínios [2.29]. Com base nas conclusões a que chegámos no Capítulo 1, parece preferível, em termos de Ciência do Projecto, vir a desenvolver a AP numa tentativa de integrar diversos dos métodos e metodologias existentes.

2.8 Resumo e Conclusões

Neste capítulo, apresentou-se a AP, as suas recentes evoluções e as interações com outros métodos e metodologias.

A AP propõe o desenvolvimento de um produto simultaneamente em quatro domínios: o das necessidades do cliente, o dos requisitos funcionais, o dos parâmetros de projecto e o das variáveis de processo. O Projecto, entendido neste contexto como Projecto de produto, é o processo de mapeamento entre os domínios funcional e físico. O primeiro descreve “o que se pretende obter”, ou seja, os requisitos funcionais (RF); o segundo “como se obtêm” fisicamente, ou, os parâmetros físicos de projecto (PP). A relação entre ambos é descrita pela equação $\{RF\} = [A] \cdot \{PP\}$, sendo A a matriz de projecto.

A AP tem dois axiomas. Estes estabelecem que um projecto correcto tem independência entre requisitos funcionais e apresenta a informação mínima necessária ao funcionamento do sistema. A informação será nula se o funcionamento do sistema ocorrer sempre nos limites especificados em projecto. Num projecto independente a matriz A é diagonal; se a matriz for triangular inferior ou superior o projecto é desacoplável e terá de haver uma sequência própria de ajuste de PP; nos restantes casos, o projecto é acoplado. Um projecto deve ser preferencialmente independente, ou eventualmente desacoplável.

Para as mesmas tolerâncias de RFs, um projecto independente tem tolerâncias superiores a nível de PPs, do que um projecto desacoplado ou acoplado. Geralmente, num projecto acoplado a dependência entre as tolerâncias dos PPs, obriga à escolha de peças de fabrico dependentes umas das outras. Como consequência, a informação necessária a um projecto acoplado será geralmente superior à de um projecto independente.

A informação fornece uma medida da complexidade real do sistema.

A determinação da informação necessita da função densidade de probabilidade do sistema no domínio funcional. Face à dificuldade de determinação desta função, propõe-se a utilização de conjuntos vagos para a obtenção de uma função de pertença (f.p.) do sistema, a partir de uma regra de implicação entre os PPs e os RFs.

Existem diversas relações entre a AP e métodos de Projecto de aceitação generalizada: em muitas aplicações, alguns dos teoremas e corolários da AP são semelhantes às soluções inventivas do TRIZ; existem semelhanças formais de manipulação entre as matrizes DSM e as matrizes de projecto da AP; a abordagem funcional é comum ao QFD e à AV; a minimização da informação é um conceito análogo à redução da relação sinal ruído do Projecto robusto de Taguchi.

Assim, propõe-se que a AP possa fornecer um quadro geral de desenvolvimento e de integração das diversas teorias de Projecto.

2.9 Contributos, Opinião e Prosseguimento

São contributos deste capítulo a apresentação da Teoria Axiomática de Projecto e seus desenvolvimentos recentes.

Esta teoria permite comparar ideias de soluções para equipamentos e sistemas. Para isso fornece critérios de escolha e de classificação dessas ideias, com uma base axiomática. Esta base permite o desenvolvimento lógico de um quadro de regras, de conclusões e de conceitos, que pode ser expandida para outros domínios que caracterizem os diversos espaços de desenvolvimento de um produto.

Esta pode ser uma linha de investigação a desenvolver: integrar na AP todos os diversos métodos de Projecto, de produto e de processo. Será eventualmente possível associar todos os métodos existentes, desde os das áreas de Marketing, a montante, até aos das áreas comerciais, mais a jusante.

A AP foi diversas vezes comprovada em aplicações de Engenharia. Os trabalhos que temos desenvolvido constituem as primeiras aplicações desta teoria aos sistemas de climatização.

Entretanto tem havido um crescente interesse na aplicação da AP a outras áreas. No livro *Complexity, Theory and Applications* (2005), Suh aplica o conceito de complexidade a sistemas biológicos e a situações sociopolíticas e económicas. Nomeadamente na área socioeconómica existe um largo campo de aplicação.

Capítulo 3

Funções em Climatização

“Many people think that air quality is merely a list of components of the air. (...) The author suggests that the definition of air quality that is common in other fields be used: quality is the extent to which human requirements are met”.

Ole Fanger, 1989

3.1 Introdução

No capítulo anterior foi apresentada a Teoria Axiomática e suas relações com outras metodologias e métodos. Segundo esta teoria, o Projecto é um mapeamento entre o domínio funcional e o domínio físico, executado em ziguezague a partir das funções do nível mais elevado e correspondentes parâmetros físicos. O processo é desenvolvido em ambos os domínios, nos quais as funções e parâmetros são decompostos para criar uma estrutura hierárquica. Para um conjunto de funções definidas a níveis mais elevados existe uma multiplicidade de soluções físicas de projecto.

Neste capítulo, pretende apresentar-se de forma sucinta o conjunto de requisitos funcionais dos sistemas de Climatização, na óptica do utilizador, baseados em normas e códigos. Transfere-se para estes documentos as decisões de mapeamento de nível elevado entre o domínio do cliente e o domínio funcional, e evita definir-se quem é o cliente de um sistema de Climatização. Saber se o cliente do sistema é o utilizador ou o investidor, e estimar o seu perfil, é o principal problema em Projecto. Este problema só é ultrapassado quando as normas aplicáveis, indispensáveis para a boa prossecução dos projectos, são referenciadas em lei.

Descreve-se, nos parágrafos seguintes, as normas Europeias (EN) e as dos Estados Unidos (ANSI/ASHRAE¹) relativas ao conforto térmico e à qualidade do ar. São estes os temas de destaque da bibliografia técnica de climatização. Na primeira secção é abordado o conforto térmico, historicamente a primeira razão dos sistemas de Climatização. São apresentados dois modelos de conforto térmico, um baseado no balanço térmico do corpo humano e outro baseado na sua capacidade adaptativa. O primeiro, proposto por Fanger, foi incorporado na norma ISO 7730 e, posteriormente, na norma americana ASHRAE 55. O

¹ ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Funções em Climatização

adaptativo, proposto por Humphreys, é aplicável utilizando a norma ASHRAE 55, tendo uma breve referência na norma ISO 7730.

Seguidamente, é apresentada uma secção dedicada à qualidade do ar. O desiderato da qualidade do ar nos edifícios surgiu após a ocorrência de graves problemas de saúde em edifícios estanques e mal ventilados. Foi tratado nas sucessivas reformulações da ASHRAE 62 e mais recentemente na EN 13779.

O ruído e a iluminação no ambiente interior são também referidos, ainda que de modo menos aprofundado.

Após apresentação dos requisitos a que as instalações devem obedecer, refere-se o conhecimento necessário à definição dos requisitos funcionais da generalidade dos sistemas de Climatização. O mapeamento entre requisitos funcionais e parâmetros de projecto é apontado até ao segundo nível no parágrafo 3.6. Este mapeamento é a base de desenvolvimento dos sistemas de Climatização descritos no Capítulo 4.

3.2 Conforto térmico

O estudo do conforto térmico é recente, sendo a maioria dos trabalhos posteriores aos anos setenta. Existiram, no entanto, trabalhos anteriores, como os Gagge (1937) sobre sudção, ou sobre trocas de calor do corpo em ambientes extremos (Hardy, 1961 e 1967), sobre metabolismo (Buskirk, 1960), sobre a temperatura e humidade da expiração (McCutchan e Taylor, 1951), sobre o efeito da sudção no estado de conforto das pessoas (Winslow, 1937), ou sobre índices que reflectissem o estado de conforto do indivíduo (Houghton e Yaglou, 1923) [3.1].

A obtenção deste tipo de índices é ainda hoje a principal preocupação do estudo do conforto humano: conjugar em poucas variáveis os efeitos dos diversos factores que intervêm no conforto térmico. Estes factores são essencialmente o metabolismo humano, o isolamento devido à roupa utilizada, a temperatura seca do ar, a temperatura radiante das superfícies envolventes, a velocidade do ar junto ao indivíduo e a humidade [3.2].

A generalidade destes factores, mesmo num ambiente interior, varia com o tempo. Em ambiente de escritórios, é comum considerar-se que as pessoas estão sujeitas a condições térmicas estacionárias, moderadas, e que desenvolvem um trabalho sem esforço físico. Assume-se para o efeito, que flutuações de temperatura com amplitude inferior a 1 °C, ou variações contínuas inferiores a 2 °C/h, são condições estacionárias.

Sendo as condições térmicas definidas em regime estacionário, a sensação psicológica da generalidade das pessoas que entrem num espaço difere da das pessoas aí presentes. Tal ocorre porque as pessoas que entram vêm aclimatadas a outras condições ou desenvolveram actividade física anterior, substancialmente diferente da prevista para o espaço referido. Neste sentido, a sensação de conforto necessita de aclimação.

Também existem índices para caracterizar as condições em que o indivíduo é sujeito a estados psicológicos de grande calor, *stress* térmico quente, ou de forte sensação de frio. Nestas últimas condições e sobre o efeito do vento tem sido utilizado um índice empírico WCI (Wind Chill Index). Para a determinação do tipo de roupa a utilizar em ambientes frios, é usado o IREQ (Insolation Required), que considera o balanço térmico do corpo humano e a temperatura nas mãos. Este método foi descrito no documento de trabalho ISO/TR 11079, recentemente transformado em norma [3.3].

A situação de *stress* térmico quente pode ser medida pelo índice WBGT (Wet Bulb Global Temperature) que considera os efeitos conjugados da temperatura ambiente, da radiação e da evaporação natural da água, não forçada. O índice WBGT é definido na norma ISO 7243 [3.4], aplicável a indivíduos com roupa típica de trabalho fabril, em boas condições físicas, para as situações em que a pessoa está aclimatada ao calor ou em processo de aclimação.

Para a previsão das condições psicológicas das pessoas sujeitas a *stress* térmico, utilizou-se nos anos 1970 e 80 o índice de constrangimento térmico. Este é dado pela relação entre a sudção necessária ao equilíbrio térmico do corpo e a máxima sudção fisicamente possível. Actualmente, a previsão do *stress* térmico considera para além deste índice, designado neste âmbito por molhabilidade da pele, a taxa de sudção máxima, o eventual armazenamento de calor no corpo ao longo de um dia e a perda máxima de água que possa ocorrer neste período. Calcula ainda o tempo máximo de exposição a condições extremas. Este método é definido na ISO 7933 [3.5], considerando as diversas trocas de calor entre o indivíduo e o ambiente. A generalidade das normas que avaliam o *stress* térmico e o conforto térmico baseiam-se no balanço térmico ao corpo humano.

Neste balanço, alcança-se o equilíbrio entre o metabolismo M , dependente da actividade desenvolvida, o trabalho mecânico W , efectuado sobre o exterior, e as trocas de calor pela pele e pela respiração. O calor libertado pela respiração tem uma componente de calor sensível C_{res} e uma componente de calor latente E_{res} ; as trocas de calor pela pele têm igualmente uma componente latente relativa à evaporação da água E_p e as componentes sensíveis, convectiva, C , e radiactiva, R . A componente de condução, K , é geralmente desprezada, quer porque a área de condução é pequena, quer porque o corpo humano contacta com superfícies isoladas termicamente.

A equação geral de balanço ao corpo humano, a seguir indicada, exprime os diversos fluxos de energia mencionados, utilizando ainda a acumulação, B , de energia no corpo humano:

$$M - W = (K + C + R + E_p) + (C_{res} + E_{res}) + B \quad (3.1)$$

Funções em Climatização

Nas normas de conforto e *stress* térmico, as variáveis na equação (3.1) são lidas como trocas de energia por área corporal do indivíduo, tendo assim como unidade o W/m^2 . Para aplicar esta expressão a um indivíduo, é portanto necessário conhecer a sua área. As primeiras expressões de balanço ao corpo humano resolveram este problema considerando um indivíduo-tipo, com cerca de 1,7 m e 70 kg de peso. Sendo necessário estimar a área corporal, ou seja, a área de uma pessoa nua, são utilizadas correlações que consideram a altura, H , e a massa, P_p , do indivíduo. Estas expressões são independentes do sexo. A expressão utilizada no âmbito das normas indicadas é a de Dubois (Delafield Dubois, Eugene Floyd Dubois, 1916), descrita nos arquivos de medicina interna de Chicago:

$$A_D [m^2] = 0,202 \cdot P_p [kg]^{0,425} \cdot H [m]^{0,725} \quad (3.2)$$

Esta expressão calcula uma área corporal geralmente inferior ao valor real (D. Mitchell, et al, 1971), pelo que algumas associações médicas preferem utilizar outras expressões.

No entanto, os fluxos de calor atravessam uma área ligeiramente superior, A_{cl} , correspondente ao indivíduo vestido. A relação entre as áreas referidas, f_{cl} , determina-se conhecendo a roupa utilizada, de acordo com a equação (3.4), descrita no próximo parágrafo.

$$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A_D} \quad (3.3)$$

3.2.1 Termoregulação e metabolismo

O corpo humano está bem adaptado para alcançar o equilíbrio térmico com o ambiente. A temperatura interior do corpo humano é regulada pelo hipotálamo. Se a actividade e as condições exteriores motivarem uma sensação de calor, o hipotálamo determina a dilatação dos vasos da pele, de modo a aumentar a temperatura na superfície da pele e assim libertar mais calor para o exterior do corpo. Se a sensação de calor for mais intensa, inicia-se o processo de sudação, que permite o rápido arrefecimento da pele por libertação de calor latente. Ao invés, se a temperatura baixar, o corpo reage primeiro por constrição dos vasos da pele, seguindo-se a actividade muscular de tremor, que pode equivaler até sete vezes ao metabolismo basal.

O metabolismo depende sobretudo da actividade física desenvolvida. A sua determinação exacta pode ser feita colocando o indivíduo num calorímetro, mas, para as aplicações correntes, o metabolismo pode ser estimado pelo consumo de oxigénio (Nishi, 1981). Uma determinação menos precisa do metabolismo pode ser feita por medição do

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

ritmo cardíaco. As diversas formas de medição do metabolismo são descritas na ISO 8996 [3.6]. A mesma norma permite prever o metabolismo considerando a actividade realizada pelo indivíduo, ou por tabelas específicas face aos movimentos físicos efectuados.

Com a idade, a capacidade metabólica máxima e o metabolismo de um indivíduo decrescem. Em geral, considera-se que um indivíduo adulto, a descansar, tem um metabolismo de cerca de 58 W/m^2 ($50 \text{ kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$). Este valor foi utilizado como unidade base nas normas relativas a ergonomia (ISO 8996,1990) com a designação de “met”. A actividade metabólica típica em ambientes térmicos moderados é de 1,2 met equivalente a $69,6 \text{ W/m}^2$ [$60 \text{ kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]. Caso o indivíduo realize tarefas a diferentes taxas metabólicas, o metabolismo médio pode ser calculado por uma média horária ponderada.

Quando a actividade desenvolvida ou as condições ambientes geram desequilíbrios térmicos no corpo, o indivíduo pode actuar sobre o seu isolamento no sentido de manter o equilíbrio térmico. A actual norma ISO 7730 [3.7], tal como na sua versão anterior de 1994, estabelece uma unidade de isolamento da roupa utilizada: o “clo”. Um clo correspondente à resistência térmica I_{cl} de $0,155 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$, aproximadamente a resistência térmica do vestuário, utilizado em ambientes interiores durante o Inverno. A norma referida apresenta valores de isolamento para diversas indumentárias. Refere ainda valores parciais de isolamento de cada peça de vestuário, condicionada pela relação da área que cobre em função da totalidade da área do corpo humano, permitindo assim obter-se o isolamento de um conjunto de peças pela simples soma dos isolamentos parciais.

Deve ainda considerar-se o isolamento devido a cadeiras ou outros elementos que se encontrem em contacto com o corpo.

O isolamento do vestuário de Verão corresponde a 0,5 clo e o de Inverno a 1,0 clo.

Sendo a área de um indivíduo vestido superior à de um indivíduo nu, as trocas pela envolvente devem ser afectadas de f_{cl} , obtidas de:

$$\begin{aligned} f_{cl} &= 1,00 + 1,290 I_{cl}, \text{ clo} \leq 0,5 \\ f_{cl} &= 1,05 + 0,645 I_{cl}, \text{ clo} > 0,5 \end{aligned} \tag{3.4}$$

3.2.2 Modelo térmico do corpo humano

Neste parágrafo faz-se um breve resumo de um modelo térmico do corpo humano, com o intuito de analisar as condições de conforto como um caso particular deste modelo.

Considere-se novamente a equação (3.1) com cada parcela expressa em W/m^2 . Tendo o metabolismo sido analisado na secção anterior, avaliar-se-á nesta secção os restantes termos. A convecção, C , é obtida conhecendo-se o coeficiente de convecção h_c e as temperaturas do ar; a radiação, R , conhecendo-se as superfícies radiantes das superfícies interiores do espaço ocupado.

Funções em Climatização

Designa-se por temperatura radiante média T_{rm} a temperatura de uma superfície negra, de área igual às superfícies envolventes que permutam calor com um indivíduo, que troque o mesmo calor por radiação com o corpo humano. Esta temperatura, em graus Kelvin é assim definida pela equação:

$$T_{rm}^4 = \sum T_i^4 \cdot F_{cl-i} \quad (3.5)$$

Sendo F_{cl-i} o factor de forma da superfície do indivíduo vestido para a superfície i , que esteja à temperatura T_i . Para pequenas diferenças de temperatura entre as superfícies, a temperatura radiante média pode ser obtida em graus Celsius: $t_{rm} = \sum t_i \cdot F_{cl-i}$. No caso de uma pessoa sentada num espaço com temperaturas diferentes, em graus Celsius, no tecto t_{tc} e no chão t_{ch} , assim como nas superfícies à sua frente t_f , atrás t_a , à sua direita t_d e à sua esquerda t_e , a temperatura radiante média é aproximadamente:

$$t_{rm} = \frac{0,18 \cdot (t_{tc} + t_{ch}) + 0,22 \cdot (t_d + t_e) + 0,30 \cdot (t_f + t_a)}{2 \cdot (0,18 + 0,22 + 0,30)} \quad (3.6)$$

De modo simplificado t_{rm} pode ainda ser obtido como $t_{rm} = \sum t_i \cdot S_i / \sum S_i$, ou seja, admitindo que F_{cl-i} depende apenas da relação entre a área da superfície i , S_i , e a área total das superfícies envolventes.

O termo radiativo pode assim ser descrito pela expressão seguinte, em que h_r incorpora a emissividade média ϵ_R das superfícies do indivíduo vestido e a relação das áreas do corpo expostas a radiação pela área total A_r/A_D , com σ_R a constante de Stefan-Boltzmann:

$$R = \epsilon_R \cdot \sigma_R \cdot \frac{A_r}{A_D} \cdot f_{cl} (T_{cl}^4 - T_{rm}^4) = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_{rm}) \quad (3.7)$$

No termo convectivo, C , o coeficiente de convecção, h_c , depende da velocidade do ar junto do indivíduo para a situação de convecção forçada, ou da temperatura da superfície no caso de convecção natural. Conhecendo-se a temperatura da superfície, t_{cl} , e a temperatura do ar t_a , a convecção é obtida de:

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (3.8)$$

Note-se que somando (3.8) e (3.7) e designado $h=h_c+h_r$, $C + R = f_{cl} \cdot h \cdot (t_{cl} - t_o)$, sendo t_o a temperatura operativa [3.7]:

$$t_o = \frac{t_a \cdot h_c + t_{rm} \cdot h_r}{h_c + h_r} \quad (3.9)$$

E que, sendo R_{cl} a resistência da roupa às trocas de calor sensível e t_p a temperatura da pele, $\frac{t_p - t_{cl}}{R_{cl}} = f_{cl} \cdot h \cdot (t_{cl} - t_o)$, pelo que as trocas de calor sensível pela pele C+R podem ser reescritas como, sendo $F_{cl} = R_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h$:

$$C + R = F_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h \cdot (t_p - t_o) = h' \cdot (t_p - t_o) \quad (3.10)$$

O termo de libertação de calor latente pela pele, E_p , depende da diferença entre as pressões parciais do vapor de água na pele p_p e no ar p_a e da resistência à passagem do vapor de água pela roupa. Esta depende da resistência à libertação de calor latente que incorpora a resistência da roupa R_e e da resistência superficial $1/(f_{cl} \cdot h_e)$. A relação entre o coeficiente de transmissão de calor latente superficial, h_e , e o coeficiente de transmissão de calor por convecção h_c , é designada por relação de Lewis, Lw , próxima de 16,5.

E_p pode, portanto, ser expressa pela equação seguinte, sendo a pressão parcial do vapor na pele p_p calculada nas condições de saturação à temperatura da pele p_{s,t_p} e ω a molhabilidade da pele [3.1]:

$$E_p = \frac{\omega \cdot (p_{s,t_p} - p_a)}{R_e + 1/(f_{cl} \cdot h_e)} = F_{e,cl} \cdot f_{cl} \cdot Lw \cdot h_c \cdot \omega \cdot (p_{s,t_p} - p_a) \quad (3.11)$$

Sendo $F_{e,cl}$ a permeabilidade do vestuário às trocas de calor latente.

As trocas de calor pela pele terão um termo difusivo E_{pd} e um termo de sudação E_{ps} .

A troca total de calor pela pele é, então, obtida da soma das equações (3.10) e (3.11), expressa em $C + R + E_p = h' \cdot \{(t_p - t_o) + \omega \cdot ip \cdot Lw \cdot (p_{s,t_p} - p_a)\}$, sendo ip um factor de permeabilidade que permite explicitar h' .

A condição psicrométrica de temperatura e humidade (TE, ϕ) que garante trocas de calor sensível pela pele iguais às das condições reais, ou seja, $C + R + E_p = h' \cdot \{(t_p - TE) + \omega \cdot ip \cdot L \cdot (p_{s,t_p} - \phi \cdot p_{s,TE})\}$, determinam TE função de ϕ :

$$TE = t_o + \omega \cdot ip \cdot Lw \cdot (p_a - \phi \cdot p_{s,TE}) \quad (3.12)$$

Funções em Climatização

Tem especial interesse o caso de a humidade relativa ser de 100%, obtendo-se a temperatura efectiva saturada TES, e o caso da humidade ser de 50% para o qual se designa TE simplesmente por temperatura efectiva, utilizando-se a sigla TE*. Esta é a temperatura exterior para a qual, com 50% de humidade relativa, se obtém o mesmo fluxo de calor da pele. Em condições de conforto, TE* depende quase exclusivamente da temperatura seca do ar.

3.2.3 Modelo de Fanger

A Fanger² deve-se o modelo de conforto humano transposto na norma ISO 7730, que posteriormente, foi também incorporado na norma ASHRAE 55. Convém lembrar que Fanger pretendeu estabelecer as condições de conforto, em regime estacionário, para espaços servidos por sistemas de climatização com comando (termóstato) centralizado. Não deve portanto ser confundido com um modelo de conforto individual, nem deve ser imposto em situações diferentes das consideradas.

Desde que, na expressão (3.1), B seja nulo, ocorre o equilíbrio térmico do corpo humano. Esta é a condição necessária para que um indivíduo possa trabalhar ao longo do dia, podendo, no entanto, expressar *stress* térmico.

Em condições de conforto térmico, para além do equilíbrio térmico referido, é necessário que a temperatura da pele t_p e a energia libertada em sudação E_{ps} , sejam aceitáveis. Nevis (1971) obteve as seguintes expressões para as condições de conforto, com t_p em graus Celsius, utilizadas posteriormente nos trabalhos de Fanger (1982):

$$t_p = 35,7 - 0,0275(M - W) \quad (3.13)$$

$$E_{ps} = 0,42(M - W - 58,15) \quad (3.14)$$

Ao termo de termoregulação por sudação E_{ps} corresponde uma molhabilidade típica da pele de 6%.

As trocas de calor por respiração, E_{res} e C_{res} , dependerão das condições de expiração do ar e das condições ambientes. Considerando as expressões referidas, com os calores em W/m^2 , a temperatura do ar t_a em °C e a pressão parcial do vapor de água no ar, p_a , em Pa, obtém-se:

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \quad (3.15)$$

² Ole Fanger (1934-2006) esteve em Portugal, Coimbra, pela última vez em 2004.

e

$$E_{\text{res}} = 1,73 \times 10^{-3} \cdot M \cdot (5.867 - p_a) \quad (3.16)$$

Considerando no termo de radiação (3.7) a emissividade média próxima de 0,95, a relação A_r/A_D de 0,73 e o valor de σ_R , obtém-se uma expressão para as trocas por radiação dada por: $R = 3,98 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4)$. Usando a molhabilidade em condições de repouso, nas quais a roupa não oferece resistência à difusão de vapor, e a relação entre a pressão de saturação do vapor de água junto à pele para a temperatura t_p , dada pela equação (3.13), o termo difusivo toma a forma $E_d = 3,05 \times 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a)$. Finalmente, é possível resolver a equação (3.1) com respeito a B, com a termoregulação por sudção (3.14) e os termos relativos à respiração C_{res} e E_{res} .

Note-se que B representa, em condições de *stress* térmico, uma acumulação de calor no corpo, mas em condições de conforto é uma variação do termo de sudção.

Como os termos de convecção e de radiação na equação (3.1) dependem da temperatura média da superfície do vestuário t_{cl} , que por sua vez varia consoante a temperatura da pele, a radiação e a convecção ($t_{cl} = t_p - I_{cl} \cdot (R + C)$), torna-se necessário resolver simultaneamente ambas as equações para obter B [3.7].

Com base em 1.296 experiências realizadas com indivíduos dinamarqueses e norte-americanos, Fanger relacionou o valor de B com uma sensação psicológica expressa numa escala de -3 (muito frio) a +3 (muito quente). Ao valor zero corresponde a sensação térmica neutra. Nas experiências realizadas, as pessoas usavam um vestuário padrão correspondente a 0,6 clo e permaneciam sentadas realizando um determinado trabalho durante três horas, enquanto anotavam as suas sensações térmicas. Com a média das últimas três anotações de cada pessoa, definiu-se o seu voto indicativo do ambiente em que estava exposta. Para ambientes com temperaturas no intervalo de 18,9 °C a 32,2 °C (66 °F a 90 °F), foi formulada a expressão de correlação entre o voto médio real, VMR, e o balanço B. Para previsão de condições de conforto, por aplicação da expressão referida, foi o VMR designado por voto médio previsível VMP [3.7]:

$$\text{VMP} = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot B \quad (3.17)$$

As pessoas que votaram com {-3,-2,+2,+3} foram consideradas insatisfeitas com o ambiente térmico. A percentagem de pessoas insatisfeitas PPI foi relacionada com o índice VMP pela expressão:

Funções em Climatização

$$PPI = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot VMP^4 - 0,2179 \cdot VMP^2) \quad (3.18)$$

Para VMP nulo existem 5% de pessoas insatisfeitas. Ou seja, 5% das pessoas consideraram o ambiente térmico correspondente a um voto médio nulo, como pertencente a $\{-3,-2,+2,+3\}$. Nesta constatação, reside a incapacidade de um sistema de climatização, com termóstato centralizado, poder agradar a todas as pessoas. A zona de grande conforto foi definida no intervalo $[-0,5 +0,5]$, a que corresponde um valor máximo de 10% de pessoas insatisfeitas.

Este modelo não deve ser aplicado a pessoas com vestuário conducente a um isolamento superior a 1,5 clo ou que seja impermeável à passagem de vapor.

O efeito do isolamento na temperatura operativa é de cerca de 6 °C/clo.

A aplicação deste modelo pressupõe moldes culturais nos quais as pessoas utilizem vestuário com o isolamento típico de Verão ou de Inverno, pelo que não deve ser aplicado a situações onde as pessoas possam livremente adaptar a roupa às condições térmicas. No Verão, é comum as senhoras utilizarem um vestuário mais ligeiro, pelo que muitas vezes a temperatura definida pelo modelo afasta-se da pretendida em condições de trabalho real [3.1].

A norma deve ser aplicada a pessoas com actividade leve sedentária, de 1 a 1,3 met. É nesta situação que as pessoas são mais sensíveis ao desconforto local. Com níveis mais elevados de actividade, as pessoas tornam-se menos sensíveis.

Diversos estudos validaram o modelo, independentemente do sexo, idade, ou proveniência. Relativamente ao sexo, a sensação térmica de homens e mulheres é análoga nas mesmas condições. As mulheres têm, no entanto, um metabolismo ligeiramente menor do que os homens, que é equilibrado com uma temperatura e uma capacidade evaporativa da pele mais baixa [3.1]. O mesmo mecanismo ocorre em pessoas de mais idade, cujas sensações térmicas de frio dependem sobretudo de uma actividade reduzida. Finalmente, qualquer pessoa, independentemente da sua proveniência, reage do mesmo modo às mesmas condições térmicas. Testes realizados com pessoas recém-chegadas de zonas tropicais à Dinamarca mostraram resultados de acordo com o modelo descrito [3.1]. No entanto, pessoas aclimatadas ao calor toleram melhor o trabalho em ambientes quentes.

Mesmo em ambientes térmicos de conforto, podem existir condições não uniformes que provoquem desconforto térmico. São, nomeadamente, as assimetrias radiantes, a pontada de ar³, as diferenças de temperatura verticais e os pavimentos quentes ou frios. Com

³ *Draft*, na literatura americana e *Draught*, na inglesa.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

assimetrias radiantes, as pessoas são especialmente sensíveis a tectos aquecidos, ou a superfícies verticais arrefecidas; são menos sensíveis a tectos arrefecidos ou a superfícies verticais aquecidas. Normalmente, os tectos arrefecidos ou aquecidos são incorporados em soluções tecnológicas de climatização; as superfícies verticais frias ou quentes são normalmente devidas aos envidraçados. Exceptuando-se estas situações, a temperatura radiante das restantes superfícies é assumida com tendo igual valor ao da temperatura do ar interior.

A percentagem de insatisfeitos, PD, devido à pontada de ar, medida para um fluxo incidente na nuca, depende da velocidade do ar junto ao indivíduo v_{ar} expressa em m/s, da intensidade de turbulência Tu , em percentagem, e da temperatura t_a em °C, pela expressão: $PD = (34 - t_a) \cdot (v_{ar} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_{ar} \cdot Tu + 3,14)$. A velocidade, também designada por velocidade residual do ar, é limitada inferiormente a 0,05 e PD é limitada superiormente a 100%. A intensidade de turbulência é a razão entre o desvio-padrão da velocidade, pela velocidade média, expressa em percentagem. Os seus valores típicos variam entre 30 e 60% e reduz-se quando a velocidade aumenta.

A diferença de temperatura vertical entre os tornozelos e a cabeça e a temperatura do solo são outros factores de insatisfação. A temperatura do solo, que origina menor percentagem de insatisfeitos entre pessoas com calçado típico de interior, é de 25 °C para pessoas sentadas e de 23 °C para pessoas a andar.

Face a todas estas possibilidades de insatisfação num ambiente térmico controlado, a ISO 7730 propõe, num anexo informativo, uma classificação destes ambientes. Para a zona de grande conforto ($-0,5 < VMP < +0,5$), a que correspondem 10% de insatisfeitos, a norma associa o espaço térmico de categoria B! Para esta categoria poderão existir 20% de insatisfeitos com a pontada de ar, 5% com assimetrias radiantes, 5% com diferenças de temperatura vertical e 10% com a temperatura do solo. Um ambiente térmico desta categoria poderá ter até 20% de insatisfeitos dos diversos tipos descritos. Existe ainda a categoria A com menor percentagem de insatisfeitos e a C com uma percentagem maior. Durante o período de arrefecimento (Verão) pretende-se que a precisão de controlo de temperatura para os edifícios de categoria A seja de ± 1 °C, para os de B de $\pm 1,5$ °C e para os de C de $\pm 2,5$ °C.

Do exposto nos pontos anteriores, interessa saber em quais dos seis parâmetros, referidos no início desta secção, é possível actuar de modo a controlar o conforto térmico no ambiente interior.

O metabolismo depende da actividade que esteja a ser realizada, pelo que não pode ser alterado; o isolamento I_{cl} é um dos pressupostos da abordagem de Fanger, com valores definidos para o Verão e para o Inverno; a temperatura radiante média t_{rm} é sobretudo

Funções em Climatização

dependente da temperatura seca do local e da exposição solar sobre envidraçados verticais. Muito embora a radiação de superfícies verticais possa afectar o conforto, é um parâmetro que depende da arquitectura da envolvente. A temperatura radiante média pode ser ligeiramente alterada por sistemas de climatização com tectos radiativos, mas o fraco efeito do tecto nessa temperatura, tal como expresso na equação (3.6), faz com que a temperatura radiante média tenha pequenas diferenças relativamente à temperatura seca do local, geralmente inferiores a 1 °C [3.8].

Assim, os sistemas de climatização actuam na temperatura seca, na humidade relativa e na velocidade residual do ar.

O efeito do aumento em 0,1 m/s na velocidade residual, com um vestuário de 0,5 clo e uma actividade de 1 met, é correspondente a reduzir em 0,4 °C a temperatura operativa. O efeito conjunto da humidade e da temperatura é expresso na temperatura efectiva TE^* . Para temperaturas usuais em conforto térmico, actividade de 1 met e vestuário de 0,6 clo, as linhas de igual TE^* são praticamente verticais num diagrama psicrométrico descrito nos eixos de temperatura operativa e de humidade específica [3.1]. No que respeita à humidade relativa, um aumento de 10% corresponde a uma subida de cerca de 0,3 °C na temperatura operativa. Resulta que o conforto térmico pode ser considerado autónomo da humidade, na gama de temperaturas e de condições de conforto térmico. Valores de humidade muito baixos podem, no entanto, originar problemas de secura nas mucosas nasais e nos olhos e valores elevados podem gerar alergias e propagar o desenvolvimento de fungos.

Portanto, considera-se relevante para o conforto térmico em ambientes de escritórios a velocidade residual do ar e a temperatura seca do local.

3.2.4 Modelos adaptativos

O modelo de Fanger aplica-se ao equilíbrio térmico e à sensação de conforto do corpo humano, independentemente do sexo, idade ou origem geográfica. No entanto, há a considerar que factores culturais, como o tipo de roupa utilizada ou a possibilidade de abertura de janelas possam intervir nas sensações de conforto. Outros efeitos como o equilíbrio térmico por variações não estacionárias de parâmetros, a adaptação à actividade ou ainda a ingestão de líquidos frios ou quentes, podem auxiliar a regular a temperatura do corpo, sendo externos à aplicação do modelo referido.

Estes comportamentos podem alterar significativamente os pressupostos de aplicação do modelo.

Além disso, como descrito anteriormente, o modelo de Fanger é estacionário. Esta situação contrasta com a de uma situação real de trabalho em escritórios, onde as pessoas realizam actividades variadas. Nomeadamente por esta razão, um estudo em 215 edifícios mostrou que apenas em 11% dos edifícios as respostas relativas ao conforto térmico indicavam 80% de satisfeitos [3.9]. Um inquérito que conduzimos a 23 pessoas que

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

trabalhavam num edifício de escritórios em Lisboa, climatizado, com grandes superfícies de envidraçados, mostrou que as respostas sobre a situação de conforto térmico não coincidiam com a previsão da ISO 7730 [3.10]. Supôs-se que as respostas tivessem sido deturpadas pelas condições normais de funcionamento do edifício, tendo as pessoas utilizado a oportunidade para expressar um descontentamento superior ao realmente sentido. Um estudo conduzido no Brasil por Virgínia Araújo (1998) indicava conclusões semelhantes.

Num esforço único, a ASHRAE coligiu numa base de dados, designada por RP-884, os resultados de 21.000 experiências sobre conforto térmico, obtidos na Austrália, Canadá, Grécia, Indonésia, Paquistão, Singapura, Tailândia, Grã-Bretanha e Estados Unidos. Utilizando esta base de dados, Dear (1998) [3.11] confirma que a adaptação às condições térmicas é efectuada por variações de roupa e da velocidade do ar, em função das condições térmicas exteriores. Aparentemente, os resultados do estudo confirmam o modelo térmico do corpo humano usado por Fanger.

Os modelos adaptativos definem a temperatura interior, em função da temperatura exterior, e associam a possibilidade de alteração da velocidade do ar e do isolamento da roupa. Os estudos de Humphreys (1972) revelaram que o tipo de roupa utilizada é muito variado, consoante o local do mundo considerado. Em testes recentes, Humphreys (2002) verificou que no Paquistão muitas pessoas exprimiam 100% de satisfação com ambientes a 30 °C, onde apenas era utilizado o aumento forçado da velocidade do ar.

A partir de dezenas de testes, Humphreys propôs uma relação entre a temperatura de conforto interior t_c e a temperatura média mensal exterior t_m , ambas em °C [3.12]:

$$t_c = 13,5 + 0,54 \cdot t_m \quad (3.19)$$

Expressões análogas foram propostas no estudo de Dear, para edifícios com sistemas de climatização e com sistemas de ventilação natural, nas quais a temperatura de conforto é relacionada com a temperatura efectiva exterior, TE_{ext}^* . Para o caso de sistemas de climatização: $t_c = 22,6 + 0,04 \cdot TE_{ext}^*$ e para sistemas com ventilação natural: $t_c = 18,9 + 0,255 \cdot TE_{ext}^*$ [3.11].

Neste estudo, não foi possível obter uma relação entre a temperatura preferida e a temperatura correspondente à sensação térmica neutra, em edifícios com ventilação natural. Concluiu-se ainda que as pessoas preferem uma ligeira sensação de frio durante o Verão e de calor durante o Inverno. Em situações em que as pessoas não possam ter controlo sobre a temperatura ambiente, o modelo de Fanger parece dar uma resposta correcta.

Funções em Climatização

Nicol e Humphreys (2002), utilizando a mesma base de dados (RP-884), realizaram uma comparação entre a sensação térmica neutra e a prevista pelo modelo de Fanger. Consideraram apenas as 16.762 experiências dessa base de dados, que usaram a escala de voto do modelo de Fanger. Concluíram que a sua distribuição é estatisticamente diferente da do VMP. A diferença entre a distribuição prevista para o índice VMP e a distribuição das experiências consideradas pode ser aproximada por uma distribuição normal de média 0,11 e desvio-padrão 1,22 [3.13]. A estimativa do VMP é, assim, geralmente superior à expressão da neutralidade térmica, o que pode dever-se à tendência das pessoas preferirem um ambiente ligeiramente mais frio durante o Verão. O estudo confirma os efeitos no índice VMP da velocidade do ar, para valores inferiores a 0,2 m/s; da humidade relativa na gama de 30% a 70%; da actividade metabólica, desde que inferior a 1,4 met; e do vestuário, desde que entre 0,3 e 1,2 clo. Para valores fora desta gama, o índice VMP tende a indicar um maior número de insatisfeitos do que os que se contam entre pessoas adaptadas a climas quentes. Os autores propõem uma nova expressão para o índice VMP e consideram o modelo de Fanger desajustado da realidade do dia-a-dia, por considerar condições térmicas de trabalho estacionário.

A polémica manteve-se, agora com uma resposta de Fanger (2002), que estudou a resposta de ocupantes de edifícios de cidades consideradas com climas quentes: Bangucoque, Brisbane, Atenas e Singapura. Para o efeito, utilizou, da mesma base, apenas os dados em que as medições eram simultâneas ao voto expresso. Argumentou que as diferenças deveriam advir de actividades metabólicas ligeiramente inferiores, nas pessoas adaptadas a climas mais quentes, e à expectativa demonstrada relativamente ao ambiente. Propôs um índice de expectativa, multiplicativo de VMP, que seria igual a 1 em zonas onde o ar condicionado em edifícios é comum. O índice variaria de 0,5 a 1,0 consoante a familiaridade das pessoas de uma cidade com sistemas de climatização [3.14].

Na realidade, nos climas quentes as pessoas são menos sensíveis a temperaturas consideradas elevadas, porque utilizam a abertura e fecho de janelas nos espaços sem ar condicionado. Admitem facilmente variações de temperatura de ± 2 °C e, em geral, são menos sensíveis às condições térmicas se lhes for possível alterar as condições de permanência no local.

Os modelos adaptativos têm sido aplicados com sucesso a climas tropicais [3.15] e a climas mediterrânicos [3.16]. Em climas mediterrânicos, reafirma-se a necessidade de controlo individual da temperatura, como meio para obter as desejadas condições de conforto. Mesmo em países com climas marítimos, como a Holanda, prevê-se que a introdução de modelos adaptativos possa permitir reduções de 10% no consumo de energia. No entanto, para edifícios com climatização com controlo centralizado, esta possibilidade pode corresponder a um aumento de 10% do consumo de energia [3.17].

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Outra variável a considerar num modelo adaptativo é o aumento da velocidade residual do ar, especialmente se o fluxo de ar for dirigido para a face do indivíduo. Num estudo em 54 edifícios em cinco cidades, estimou-se que o aumento da velocidade residual do ar poderia reduzir o consumo de energia para arrefecimento entre 17% a 48% [3.18]. Num outro estudo, foram efectuadas medições de temperatura de globo no interior do edifício e da temperatura exterior, com as janelas abertas e fechadas. Os resultados mostram que as pessoas admitem temperaturas de globo interiores, superiores em 1,2 °C quando as janelas se encontram abertas. A diferença obtida das médias das temperaturas com as janelas abertas e fechadas foi de 5,9 °C. Para temperaturas de globo de 20 °C apenas 10% das janelas estão abertas, a 24 °C cerca de 50% e a 27 °C cerca de 90% das janelas eram abertas. A velocidade residual média com as janelas abertas é de cerca de 0,06 m/s superior, a que equivaleria uma redução de 0,6 °C, para a condição existente de velocidade residual [3.19]. As janelas podem ter um efeito de arrefecimento significativo. A instalação de ventoinhas de tecto é ainda outra possibilidade. Um estudo efectuado na Califórnia permitiu verificar que com uma temperatura operativa 25,5 °C, 77% dos ocupantes manifestavam aceitação a velocidades verticais de até 1 m/s, sem controlo individual [3.20]. Os autores propunham a utilização deste tipo de equipamentos em instalações de climatização, com sistemas mistos, activos e adaptativos.

O conceito de temperatura adaptativa também tem sido utilizado nos casos em que a temperatura de insuflação de sistemas centralizados é alterada em função das condições exteriores [3.21]. Estima-se que sistemas de optimização possam reduzir o consumo de energia em cerca de 7%. Estes sistemas podem ser utilizados com os índices VMP na zona de conforto, com vantagens em termos de conforto e de consumo de energia [3.22].

Acresce que a possibilidade de alteração da temperatura local, dependente dos critérios individuais, reduz a percentagem de insatisfeitos. No CIAR 99⁴, em Lisboa, Fanger expôs esta vantagem propondo uma distribuição de ar condicionado individualizada, associada e controlada em cada posto de trabalho, que designou por *personal air*.

Em 2007, Humphreys e Hancock questionaram se a sensação de conforto depende da neutralidade térmica. Em testes realizados na Grã-Bretanha, 57% das respostas de pessoas em situações de conforto não configuravam a neutralidade térmica. As pessoas preferiam os ambientes neutros ou os ligeiramente quentes [3.23]. Utilizando a base de dados SCAT de um estudo europeu sobre 26 edifícios de escritórios em cinco países (França, Grécia, Portugal⁵, Suécia e Reino Unido), com os resultados de 4655 experiências, Nicol e

⁴ V Congresso Iberoamericano de Ar Condicionado e Refrigeração.

⁵ Portugal participou através da Universidade do Porto.

Funções em Climatização

Humphreys em 2007, reafirmaram as diferenças entre o índice VMP e a sensação de desconforto. Estimaram para VMP nulo, 14% de insatisfeitos em vez dos 5% previstos pelo índice PPI [3.24]. Propuseram uma temperatura de conforto t_c dependente da temperatura exterior média do dia anterior $t_{ext(n-1)}$ e de uma temperatura média para o mês corrente até ao dia n , $t_{mês(n)}$, que numa expressão simplificada é dada por:

$$t_{mês(n)} = 0,2 \cdot t_{ext(n-1)} + 0,8 \cdot t_{mês(n-1)} \quad (3.20)$$

Para edifícios com controlo adaptativo (sem aquecimento ou arrefecimento) durante o Verão, Humphreys propõe para a temperatura de conforto a expressão: $t_c = 0,33 \cdot t_{mês(n)} + 18,8$, e para edifícios com ar condicionado: $t_c = 0,09 \cdot t_{mês(n)} + 22,6$, sendo as temperaturas expressas em graus Celsius. As condições interiores são aceitáveis, se a temperatura de globo interior estiver numa gama de ± 2 °C em redor da temperatura de conforto obtida das expressões anteriores. Nestas condições, estima-se que 80% das pessoas estariam termicamente confortáveis.

Estas expressões mostram a menor dependência da temperatura de conforto face às condições exteriores, em edifícios climatizados.

A adaptação térmica é um dos métodos aplicáveis para avaliação do conforto térmico incorporados na EN 15251: 2007 [3.25]. Pretende-se, aliás, que esta norma contribua para a construção mais generalizada de edifícios, onde a temperatura seja controlada pelo utilizador, e onde se recorra a técnicas passivas de climatização [3.26].

Estando provado o uso de conforto adaptativo em ambientes térmicos, está no entanto por provar que a produtividade das pessoas nestes ambientes seja igual à produtividade em ambientes com temperatura controlada. Alguns estudos indicam que o aumento de temperatura reduz a produtividade.

Pelas razões apresentadas, a recente versão da ASHRAE 55 expõe, a par do modelo de Fanger, o modelo adaptativo. A ISO 7730 apenas refere a possibilidade de adaptação. No entanto, ambas admitem, para ambientes sedentários, variações de temperatura até 3 °C acima dos valores definidos para VMP nulo, se forem usadas velocidades residuais até 0,8 m/s. A norma ISO refere esta velocidade a título informativo, mantendo para velocidade residual de referência o valor de 0,2 m/s.

3.2.5 Funções associadas ao conforto térmico

O modelo adaptativo não contradiz necessariamente o modelo de Fanger. Permite considerar factores culturais que o apliquem noutras condições, em que o isolamento da roupa e a velocidade residual do ar possam variar. O modelo adaptativo permite ainda ajustar temporariamente as condições térmicas, numa sucessão de estados não estacionários, mas que, no conjunto, garantem o conforto térmico. Estes ajustamentos são realizados por cada utilizador por acertos locais da temperatura e pela utilização de ventilação natural associada à abertura de janelas.

O modelo adaptativo tem sido cada vez mais utilizado em climas temperados, tendo como consequência a necessidade de abertura de janelas e a regulação individual da temperatura. As necessidades de arrefecimento podem aliás ser reduzidas pela utilização de ventilação cruzada. Tem como consequência arquitectural a eliminação de escritórios de grandes dimensões (*open-spaces*), a necessidade de abertura de janelas e a variação da taxa de ventilação.

Em qualquer caso, do referido nos parágrafos 3.2.3 e no 3.2.4, conclui-se que existem basicamente duas funções a assegurar por um sistema de climatização, associadas ao conforto térmico:

- Garantir a temperatura apropriada;
 - Garantir a velocidade residual apropriada.
- A que se associa uma restrição:
- Limitar superior e inferiormente a humidade.

3.3 Qualidade do Ar

Os problemas de qualidade do ar interior (QAI) nos edifícios passaram para o domínio público após as crises petrolíferas de 1973-74 e de 1979-82. As altas do petróleo subsequentes ditaram medidas de redução do consumo de energia.

As principais medidas que foram implementadas nos edifícios consistiram no aumento de isolamento da envolvente, no reforço da sua estanqueidade e, concomitantemente, na redução dos caudais de ar novo. À época, foi considerado suficiente utilizar caudais de ar novo por pessoa de 5 a 10 m³/h, valores que pareceram aceitáveis face às necessidades humanas de respiração inferiores a 0,5 m³/h. A norma ASHRAE sobre ventilação de 1981⁶, revisão da primeira norma de ventilação natural e mecânica de 1973⁷, aconselhava um

⁶ ASHRAE 62-1981, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.

⁷ ASHRAE 62-1973, *Standard for Natural and Mechanical Ventilation*.

Funções em Climatização

caudal de $8,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa}^8)$. Na sequência da aplicação de baixos caudais de ar novo em edifícios de elevada estanqueidade, foram surgindo diversos problemas alérgicos e respiratórios nos ocupantes dos edifícios alterados, designados no conjunto por “Síndrome do Edifício Doente”⁹ (SED). Estes problemas motivaram diversos estudos sobre a QAI nos anos 90, que permitiram sucessivas revisões da ASHRAE e o aparecimento da CR 1752 em 1998. Este trabalho muito deveu às contribuições dos estudos de Ole Fanger.

O objectivo das normas ASHRAE e das EN tem sido ligeiramente distinto. Com as primeiras pretende alcançar-se um nível mínimo de qualidade do ar aceitável, aliás expresso na designação da norma. Nas normas EN pretende obter-se um ambiente com qualidade do ar enquadrável em diversos níveis.

Face à dificuldade de estabelecer uma relação rigorosa entre os diversos poluentes de espaços interiores e os seus efeitos na saúde dos ocupantes, a classificação da qualidade do ar tem sido feita por métodos indirectos. Estes baseiam-se na sensação expressa por pessoas que permaneçam num espaço, ou, em alternativa, na sensação expressa ao entrarem nesse espaço. Algumas destas sensações podem ser do foro clínico, tais como alergia, falta de ar, dor de cabeça, secura na garganta ou irritação nos olhos.

Para controlar o nível de qualidade do ar, têm sido utilizadas fundamentalmente três técnicas de controlo de poluentes: diluição, captação local e redução das emissões.

A técnica mais utilizada é a diluição de poluentes, obtida pela ventilação dos locais ocupados em função do número de pessoas e do espaço ocupado. Esta técnica é designada por procedimento da taxa de ventilação. Para além deste procedimento, a norma ASHRAE 62.1 [3.27] estabelece o método da qualidade do ar. Neste procedimento, a qualidade do ar é imposta por níveis máximos de poluentes. Sendo conhecidos os principais poluentes, ou os seus indícios, é possível utilizar a técnica de diluição ou de captação desses poluentes, de modo a poder controlá-los em níveis considerados aceitáveis.

O desconhecimento do tipo de poluentes, no ambiente interior de um edifício de serviços, tem motivado a utilização da concentração de CO_2 como gás de rastreio¹⁰ para descrever a qualidade do ar interior. Uma concentração elevada de CO_2 aponta para a possibilidade de existência de concentrações de outros poluentes, que no seu conjunto podem criar ambientes prejudiciais à saúde.

Nos pontos seguintes, descreve-se a equação de concentração de um qualquer poluente e enunciam-se casos particulares da sua aplicação. Descreve-se ainda as diversas normas que definem as taxas de ventilação, concluindo-se com a classificação actual dos edifícios

⁸ Apenas “ps” nas ocorrências seguintes de unidades relativas a “pessoa”.

⁹ *Sick Building Syndrome* (SBS) na literatura anglo-saxónica.

¹⁰ Normalmente designado pelo anglicismo de gás “traçador”.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

em função da sua qualidade do ar. Depois, indica-se os principais poluentes presentes nos ambientes interiores e as concentrações a controlar destes poluentes. Analisa-se ainda alguns materiais de construção como fontes de poluição e apresenta-se os filtros como um dos modos de captação de poluentes.

3.3.1 Equação de concentração de um espécimen

Quando a concentração de um espécimen ultrapassa determinados valores, podem ocorrer efeitos nefastos na saúde dos ocupantes. A concentração é geralmente expressa em ppm (partes por milhão em volume) ou em unidades de massa por metro cúbico de ar, por exemplo em mg/m^3 . Para um espécimen i de massa molecular M_i [kg/kmol], que ocupa um volume molar V_m [m^3/kmol] em determinadas condições de pressão e de temperatura, a relação entre a concentração volúmica e mássica é expressa por:

$$1 \text{ [ppm}_i\text{]} = \frac{M_i}{V_m} \left[\frac{\text{mg}_i}{\text{m}_{\text{ar}}^3} \right] \quad (3.21)$$

Em condições PTN, o V_m é de $22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$; à pressão atmosférica a 24°C é de $24,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$.

A equação de concentração de um espécimen pode ser obtida por balanço a um espaço interior de volume V , onde entra um caudal de ar qv com uma concentração mássica desse espécimen C_a . Admita-se que a concentração média desse espécimen no espaço interior é C_i e que é libertada no ar uma carga de poluição G , obtida por reacção química ou pelo resultado conjunto do equilíbrio de fenómenos de absorção, adsorção ou captação.

Admita-se ainda que o caudal de ar não varia significativamente com a mudança de temperatura entre a entrada e a saída e que apenas a fracção ε do caudal volúmico banha a zona ocupada. A fracção ε é denominada por eficácia de ventilação. Suponha-se ainda que as concentrações médias do espécimen em todo o volume da sala são equivalentes às da zona espaço ocupada.

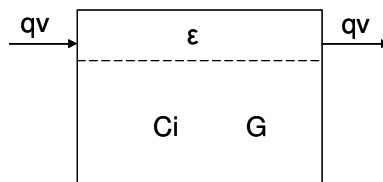


Figura 3.1. Caudal volúmico e geração de um espécimen

Então, do balanço mássico ao volume, indicado na figura anexa, obtém-se a seguinte equação diferencial:

Funções em Climatização

$$\varepsilon \cdot qv \cdot C_a + G - \varepsilon \cdot qv \cdot C_i = V \cdot \frac{dC_i}{dt} \quad (3.22)$$

Considerando $C^* = C_i - C_a$, integrando a equação (3.22), considerando a concentração exterior C_a constante no período de integração, tomando a concentração interior variável no tempo e denominando n a taxa de renovação do ar dada por $\frac{qv}{V}$, obtém-se para uma diferença de concentrações inicial C_{ini}^* :

$$C^*(t) = C_{ini}^* \cdot e^{-\varepsilon \cdot n \cdot t} + \frac{G/V}{\varepsilon \cdot n} (1 - e^{-\varepsilon \cdot n \cdot t}) \quad (3.23)$$

Note-se que para $t=0$ obtém-se $C^*(0)=C_{ini}^*$ e que para $t=\infty$ obtém-se a expressão para o regime estacionário:

$$qv = \frac{G}{C^*} \cdot \frac{1}{\varepsilon} = \frac{G}{C_i - C_a} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (3.24)$$

Se a eficácia, ε , for unitária e a concentração do espécimen no ar de entrada for nulo ou desprezível, C_a é zero e o caudal volúmico é $qv = \frac{G}{C_i}$, expressão que é muito utilizada no cálculo do caudal de insuflação em salas limpas.

A eficácia de ventilação pode ser obtida medindo as concentrações na extracção C_{ex} , da insuflação de ar novo C_a e num ponto representativo da média das concentrações interiores C_i . Fazendo o balanço mássico junto da extracção: $\varepsilon \cdot qv \cdot C_i + (1 - \varepsilon) \cdot qv \cdot C_a = qv \cdot C_{ex}$ logo:

$$\varepsilon = \frac{C_{ex} - C_a}{C_i - C_a} \quad (3.25)$$

No caso da taxa de renovação n tender para zero, a concentração aumenta linearmente com o tempo e da equação (3.23) obtém-se: $C^* = C_{ini}^* + \frac{G}{V} \cdot t$. Finalmente, se o espaço tiver uma concentração inicial de um espécimen e não houver libertação de carga de poluição ($G=0$), a sua concentração do espécimen decai exponencialmente segundo a equação:

$$C^* = C_{ini}^* \cdot e^{-\varepsilon \cdot n \cdot t} \quad (3.26)$$

3.3.2 Poluentes e suas concentrações¹¹

A interacção entre diversos poluentes e as reacções fisiológicas provocadas no ser humano é um fenómeno ainda pouco conhecido, que pode variar de acordo com o indivíduo e mesmo com as condições psicrométricas do ambiente. Estas interacções podem originar reacções diversas, mais que proporcionais às variações de concentrações de cada poluente, ou, ao invés, menos que proporcionais. No caso de um quadro de SED, deve ser considerada a hipótese de vários poluentes interagirem com o sistema imunológico das pessoas. Estudos de Berglund de 1982 a 1989 confirmaram a existência de percepções multi-sensoriais em edifícios, que contrastavam com as conhecidas reacções a um único poluente que ocorrem na indústria.

Na indústria foram definidas as concentrações-limite de permanência durante a jornada de trabalho (TLV¹²) para diversos compostos. São exemplos os valores de 55 mg/m³ para o monóxido de carbono, de 1,5 mg/m³ para o formaldeído, ou de 6 mg/m³ para o dióxido de azoto, valores geralmente de uma ordem de grandeza acima das concentrações admissíveis em escritórios.

Na realidade, ocorreram problemas de QAI em ambientes com concentrações de poluentes muito inferiores aos TLV. Os problemas causados parecem estar no conjunto de interacções provocadas pelos diversos poluentes, designado por síndrome multiquímico. Na ausência de indicações precisas relativas ao controlo de um tipo de poluente em ambientes interiores, pode estimar-se em um décimo de TLV o máximo da sua concentração interior.

Diversos códigos indicam valores limite para a concentração de poluentes em ambientes interiores, nomeadamente a EPA (U.S. Environmental Protection Agency), OSHA (U.S. Occupation Safety & Health Administration), NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), ou a OMS (WHO: World Health Organization). As duas primeiras são obrigatórias na aplicação dos requisitos da ASHRAE 62.1. A OMS tem programas próprios para a Europa, sendo esperado para breve um código sobre qualidade do ar no interior dos edifícios. A legislação nacional inclui o regulamento RSECE [3.28], relativo aos sistemas energéticos em edifícios, que inclui também disposições sobre a qualidade do ar interior.

As fontes de poluição interiores são diversas e dependem do tipo de utilização do espaço. Quando as pessoas são a principal fonte de poluição, pode ser utilizado o controlo pela concentração de CO₂. Em ambiente de escritórios, este método permite controlar odores e limitar a percentagem de insatisfeitos com o ar interior. É aceite que uma

¹¹ Esta secção incorpora o resumo de cerca de 35 artigos da revista mensal *IEQ Strategies, Practical Advice for the Control of Indoor Environmental Quality*, dos anos de 1998 a 2003.

¹² TLV- Threshold Limit Value

Funções em Climatização

concentração interior de CO₂ inferior a 1.000 ppm é representativa de uma boa QAI. Este foi um dos requisitos dos edifícios com a classificação *Energy Star*, promovida pela EPA. O nível mínimo de QAI pode também ser estabelecido pela diferença de 700 ppm entre a concentração interior máxima de CO₂ e a concentração exterior. O RCESE estabelece 1.800 mg/m³ como valor limite de concentração interior de CO₂, equivalente a cerca de 1.000 ppm. No entanto, concentrações interiores de CO₂ de 1.000 ppm a 5.000 ppm são apenas indicativas de que outros poluentes poderão estar a ser removidos a taxas deficientes, sem que as concentrações de CO₂ de *per si* possam ter efeitos nefastos na saúde dos ocupantes.

Conhecidas as concentrações de CO₂ no exterior e aquela que é pretendida para o interior do edifício, a taxa de ventilação pode ser obtida pela aplicação da equação (3.24), logo que for conhecida a geração de dióxido de carbono devida à ocupação humana.

Nos ambientes referidos, a geração interior de CO₂ depende da função respiratória dos ocupantes. Uma pessoa adulta em descanso tem o volume normal de respiração de 10 m³ de ar por dia, ou seja, cerca de 0,42 m³/h. O consumo de oxigénio resultante é de 25 l/h e a produção de dióxido de carbono, de 19 l/h. Estes valores aumentam com a actividade dos ocupantes e variam com o tipo de dieta. A libertação de CO₂ é maior em pessoas com dietas à base de hidratos de carbono. No quadro seguinte indica-se a libertação típica de CO₂ e de vapor de água, em função da actividade em met.

Actividade	Actividade [met]	CO ₂ [l/(h·ps)]	Vapor de água [g/(h·ps)]
Sedentária	1 a 1,2	19	50
Exercício leve	3	50	200
Exercício médio	6	100	430
Exercício elevado	10	170	750

Quadro 3.1. Libertação de CO₂ e H₂O por pessoa em função da actividade

O controlo de CO₂, ou da poluição interior, deve ser preferencialmente feito por indivíduos que entram num espaço e não por pessoas aclimatadas. Em alternativa podem utilizar-se dispositivos apropriados. Ao fim de algum tempo, as pessoas acostumam-se aos ambientes com poluição. Experiências em salas de aula mostraram que mais de metade das salas apresentavam concentrações médias de CO₂ superiores a 1.000 ppm [3.29]. Experiências análogas realizadas numa escola perto de Londres demonstraram que o limite de 1.500 ppm era sistematicamente excedido ao longo do dia. Os alunos e professores abriam as janelas para controlar a temperatura interior, não sendo sensíveis ao aumento de poluição interna [3.30]. Note-se, no entanto, que a ASHRAE definiu as taxas de ventilação com base em estudos da percepção de pessoas, ambientadas às condições dos espaços.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Na maioria dos edifícios, a carga de poluição associada aos materiais de construção e de mobiliário não pode ser desprezada. Em alguns casos, as elevadas emissões dos materiais constituem a principal carga de poluição interior. Nestes edifícios, o controlo da ventilação pela concentração de CO₂ pode não ser suficiente.

São vários os poluentes comuns em ambientes interiores que causam efeitos negativos à saúde. Sem pretensão de apresentar todos os possíveis poluentes de ambientes interiores, indica-se em seguida aqueles que são mais citados em normas e regulamentos.

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido. Normalmente, é formado devido à combustão incompleta de combustíveis e matérias orgânicas. Sendo reactivo com o oxigénio, a sua concentração diminui com a distância à fonte de emissão. Surge no interior dos edifícios por migração através de interligações com garagens ou por admissão dos gases de combustão de caldeiras. É cerca de 200 vezes mais reactivo com a hemoglobina do que o oxigénio, pelo que ao ser inalado reduz a capacidade do sangue levar o oxigénio às células. Pode causar problemas especialmente graves a pessoas com doenças de coração ou circulatórios.

O formaldeído (HCHO) é um gás incolor, mas com odor facilmente identificável. Foi considerado cancerígeno em 2004 pela IARC (International Agency for Research on Cancer), com base em evidências de estudos epidemiológicos que sugeriam a sua relação com o cancro na zona nasofaríngea e nos pulmões. É geralmente causador de irritações nos olhos, nariz e garganta. Costuma ser utilizado em resinas para aglomerados de madeira, plásticos, solventes e tintas, sendo portanto comum em edifícios recém acabados ou recém-mobilados. O formaldeído é um dos principais COV carcinogénico.

Em ambientes de escritórios, existe uma relação entre a concentração de formaldeído (HCHO) e a do CO₂. Experiências em 442 edifícios de escritórios mostraram que a concentração média de CO₂ de 642 ppm é correlacionada estatisticamente com a de HCHO de 32 µg/m³ [3.31]. Os códigos de saúde do Canadá prevêem uma concentração de HCHO em ambientes interiores inferior a 50 µg/m³. A taxa de renovação mínima de 0,35 ren/h, prevista na ASHRAE para o sector doméstico, é geralmente suficiente para manter a concentração de formaldeído dentro de limites aceitáveis [3.32].

O chumbo (Pb) pode causar efeitos nefastos no cérebro e no sistema nervoso, sendo especialmente danoso para crianças. Surge nos ambientes interiores por via da sua incorporação em tintas. Nos países em que a gasolina pode conter chumbo, aparece associado aos gases de escape.

O dióxido de azoto (NO₂) é originado em processos de combustão a elevadas temperaturas. É um gás ligeiramente acastanhado, com odor. Provoca danos nos pulmões e no sistema respiratório, causando irritação respiratória e bronquite. Os óxidos de azoto NO_x podem reagir com compostos orgânicos voláteis, originando, entre outros gases, o ozono.

Funções em Climatização

O ozono (O_3) é um gás incolor, de cheiro “metálico”, originado pelas reacções dos NO_x , ou por efeitos electrostáticos. Fotocopiadoras, impressoras laser, filtros electrostáticos e alguns purificadores de ar são alguns dos equipamentos presentes em ambientes de escritórios que originam a formação do ozono. Nos anos 1980 e 90 foi considerado como gás purificador do ar, dada a facilidade de reacção com bactérias. No entanto, este gás apenas tem um efeito bactericida evidente em concentrações elevadas, causadoras de danos aos seres humanos. Alguns edifícios foram equipados com doseadores de ozono nas unidades de tratamento de ar, provocando diversos problemas respiratórios, irritação dos olhos ou asma. É aceite que a sua presença no ambiente interior reduz a resistência dos seus ocupantes a constipações e a infecções.

As partículas são normalmente classificadas em respiráveis e inaláveis. Uma possível classificação considera as partículas inaláveis as que têm diâmetro aerodinâmico até $10\ \mu m$, designadas por PM_{10} . As respiráveis, que têm até $2,5\ \mu m$ de diâmetro, são designadas por $PM_{2,5}$ e têm uma dimensão que lhes permite alojarem-se nos alvéolos dos pulmões. A perigosidade destas partículas depende sobretudo da sua solvabilidade na água. Pequenas partículas solúveis tendem a ser eliminadas nas mucosas dos pulmões, mas as não-solúveis podem ficar permanentemente nos pulmões.

Um aumento da concentração de partículas em $25\ \mu g/m^3$ parece estar relacionado com o aumento da incidência de ataques de coração em 48%. A maior importância dada actualmente às partículas $PM_{2,5}$ tem motivado o aparecimento de modelos de dispersão destas partículas, que devem considerar a sua baixa taxa de deposição, a sua geração e a capacidade de filtração [3.33].

As partículas causam irritação na garganta, bronquite e danos nos pulmões, efeitos em que as partículas respiráveis desempenham um papel especialmente importante. São causadas por combustão de madeira e outros combustíveis, sendo a combustão de tabaco uma fonte comum nos ambientes interiores. Podem ainda ter origem no ar atmosférico. Finalmente, podem provir de isolamentos de fibra de vidro ou de amianto. Depois de um período de preocupação com as partículas PM_{10} nos anos 1990, as atenções dos higienistas de edifícios têm vindo a centrar-se nas partículas respiráveis.

O número de partículas de pequena dimensão é de ordens de grandeza superiores às de dimensão maior. Num estudo numa escola na Tailândia, obteve-se concentrações medianas de partículas por metro cúbico, que variavam de $1,6 \times 10^8$ para partículas de $0,3$ a $0,5\ \mu m$ até, apenas, $4,1 \times 10^5$ para partículas de $2,5$ a $5,0\ \mu m$ [3.34]. A sua distribuição, em ambientes de atmosfera controlada, pode ser aproximada por uma lei de potência. Esta lei pode também servir para estimar o número de partículas em ambientes de escritórios. O número, N_δ , de partículas de dimensão superior a δ pode ser obtido conhecido o número

N_{δ_0} de partículas de uma dimensão superior a um padrão δ_0 , pela lei de potência descrita na FS¹³ 209 E:

$$N_{\delta} = N_{\delta_0} \cdot \left(\frac{\delta_0}{\delta}\right)^{2,209} \quad (3.27)$$

É possível limitar a concentração de partículas aos valores desejados, desde que se utilize a filtração adequada. Os valores de concentração interior podem, por hipótese, ser muito inferiores aos da atmosfera. No entanto, há a considerar que a filtração excessiva causará um ambiente quase asséptico, o que, na opinião de imunologistas pode trazer outros problemas graves para o sistema imunitário.

O radão é um gás incolor, inodoro e insípido, proveniente da desintegração do rádio. É um gás comum em solos vulcânicos, nomeadamente graníticos. Quando é inalado, o radão aloja-se nos alvéolos dos pulmões, podendo causar cancro nos pulmões.

O dióxido de enxofre (SO_2) é formado na queima de combustíveis com enxofre, nomeadamente naftas e carvão. Actualmente, é comum ser detectado apenas em zonas próximas de espaços industriais. Em contacto com a água, forma o ácido sulfúrico. Por esta via, pode causar problemas respiratórios e o necrosamento dos pulmões, agravando concomitantemente eventuais problemas cardiovasculares.

Os compostos orgânicos voláteis (COV) surgem em diversos materiais de mobílias, produtos de limpeza, de higiene pessoal, solventes, tintas e outros produtos de impressão. Podem surgir associados a fotocopiadoras e a impressoras laser. As emissões provenientes destes equipamentos parecem depender da temperatura ambiente. As reacções dos seres humanos a produtos com COV são muito variáveis, sendo por vezes influenciadas por razões psicológicas. No entanto, testes com painéis de indivíduos a misturas de vários COV deram reacções similares. Algumas síndromes multiquímicas são causadas por compostos químicos de período de vida curto, provenientes de reacções entre COV existentes no ambiente. Tem-se tentado uniformizar num único parâmetro a medida do conjunto dos diversos COV, designado por COV totais. Esta medida, além de criticável pela variedade de COV existentes e reacções pessoais, toma valores diferentes dependendo do método de medida. Actualmente, o método de medida mais comum é o de sonda de isobutileno (C_4H_8).

Os produtos clorados são também causa de reacções adversas das pessoas ao ambiente interior. Inclui-se nestes produtos os revestimentos de PVC. Verificou-se, usando um painel de indivíduos, que as pessoas preferiam revestimentos de carpete a alguns

¹³ FS – Federal Standard

Funções em Climatização

revestimentos de PVC. Estes revestimentos podem ter libertações de cloro muito díspares variando de um material para outro em diversas ordens de grandeza.

No quadro seguinte, indica-se os valores limite de concentração de diversos poluentes em ambientes interiores, conforme apresentados em diversos códigos.

Poluente ⁽²⁾	EPA ⁽¹⁾ [mg/m ³]	OSHA ⁽¹⁾ [mg/m ³]	NIOSH ⁽¹⁾ [mg/m ³]	OMS/Europa ⁽¹⁾ [mg/m ³]	RSECE ⁽⁴⁾ [mg/m ³]
PM 10	0,05 {1 ano} 0,150 {24 h}				0,15
PM 2,5	0,015 {1 ano} 0,065 {24 h}	5			
CO ₂		9.000	9.000 54.100 {15 min}		1.800
CO	10,3 ⁽³⁾ 40,2 {1 h} ⁽³⁾	57	40 230 {máximo}	28,7 {1 h} 11,5	12,5
O ₃	0,24 {1 h} ⁽³⁾ 0,16	0,2	0,2 {máximo}	0,13	0,2
NO ₂	0,09 {1 ano}	9 {máximo}	1,9 {15 min}	0,2 {1 h} 0,04 {1 ano}	
HCHO		0,92 2,5 {15 min}	0,02 0,12 {15 min}	0,1 {30 min}	0,1
SO ₂	0,08 {1 ano} 0,37 {24 h} ⁽³⁾	13	5,3 13,1 {15 min}	0,13 {24 h} 0,05 {1 ano}	
COV					0,6
Radão				100 Bq/m ³ {1 ano}	400 Bq/m ³
Pb	0,0015 {3 meses}	0,05		0,000.5 {1 ano}	

Quadro 3.2. Limites de concentração interior recomendados por organizações e regulamentos

⁽¹⁾ Valores adaptados do Apêndice B da ASHRAE 62.1, para V_m de 24,4 m³/kmol.

⁽²⁾ Valores médios de concentrações nos tempos indicados em chavetas; por defeito são valores médios em 8h.

⁽³⁾ Sem que seja excedido mais de 1 vez por ano.

⁽⁴⁾ Subentendem-se como valores máximos.

Há ainda a considerar o fumo de cigarro que contém centenas de compostos químicos e uma quantidade apreciável de partículas. A dimensão média das partículas libertadas na combustão de cigarros é de 0,2 µm. A produção média de partículas situa-se entre 0,7 a 0,9 mg/min [3.35]. Um cigarro produz 22±8 mg de partículas PM10. É interessante comparar este valor com as partículas PM10 emitidas por uma impressora, que é de 1 a 10 µg por página; ou com a emissão de uma fotocopiadora, que é de 1,5 a 3,0 mg/h [3.36].

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

O controlo de poluentes provenientes do tabaco é muito difícil. A ASHRAE14 recomendou a separação física entre salas de fumadores e de não fumadores para permitir o controlo à exposição ao fumo de tabaco (ETS). No entanto, os efeitos adversos dos utilizadores de salas onde é permitido fumar não pode ser controlado apenas pela utilização de sistemas de ventilação. Num estudo em dois bares em Toronto constatou-se a impossibilidade de controlo das partículas por um sistema de ventilação por fluxo tampão¹⁵ [3.37]. O projecto de salas para fumadores deve considerar uma depressão relativamente aos ambientes circundantes de -5 a -7 Pa. Com cerca de -9 Pa, obtém-se 95% de eficiência de exaustão do fumo de tabaco. O efeito de abertura de portas induz a transferência de cerca de 10% dos contaminantes para as salas adjacentes, pelo que devem ser utilizadas portas de correr [3.38].

Até finais dos anos 90, a preocupação do mercado centrou-se nos produtos químicos presentes no ar e nas partículas. No início desta década, as preocupações recaíram nos problemas do tabaco e dos microorganismos. Nos EUA, em especial, tem havido uma preocupação crescente com microorganismos, nomeadamente bolores.

Os bolores libertam toxinas que parecem estar na origem de certos danos cerebrais, nomeadamente a falta de memória e deficiência de raciocínio. A exposição de curta duração a estes fungos é associada a alergias permanentes a alguns alimentos, a químicos e a perfumes. Os bolores crescem nos edifícios em ambientes húmidos, fortemente dependentes do tipo dos materiais de construção. A utilização de madeiras e seus compostos facilita o desenvolvimento de fungos. O tipo de isolamento interior de condutas e de equipamentos de ar condicionado tem também uma importância determinante no crescimento de fungos nessas instalações. Sempre que possível, deve haver apenas chapa lisa em contacto com o ar. Os fungos podem ainda surgir em materiais de revestimento interior, nomeadamente carpetes. A identificação de focos de fungos é realizada pelo odor, ou por avaliação visual. Em alguns casos, têm sido utilizados cães treinados.

O desenvolvimento de microorganismos depende ainda do tipo de material. O crescimento de ácaros na lã é substancialmente inferior ao seu crescimento em *nylon*.

O limite estabelecido pelo RSECE, para o aparecimento de unidades formadoras de colónias (UFC) de fungos, é de 500 por m³ de ar. Esta mesma concentração limite é estabelecida para as bactérias.

A recolha de amostras de fungos ou de bactérias patogénicas são normalmente realizadas por fluxo de ar de impacto sobre caixas que contêm o meio de cultura. Têm

¹⁴ ASHRAE 2005 *Environmental Tobacco Smoke*, tomada de posição sobre o fumo de tabaco aprovado pelo BOD a 30 Junho 2005.

¹⁵ *Displacement*, na literatura anglo-saxónica.

Funções em Climatização

surgido novas técnicas de detecção, nomeadamente técnicas ópticas e electroquímicas. Qualquer uma destas tem maiores erros associados do que os métodos de cultura. Os métodos ópticos permitem uma melhor sensibilidade que os electroquímicos, mas são mais caros e de difícil utilização [3.39].

É do conhecimento público a importância que se dá ao aparecimento da bactéria *Legionella Pneumophila* em sistemas de climatização. A *Legionella* é uma bactéria existente na natureza em zonas com água, que se alimenta de cisteína, um aminoácido, e sais de ferro. Regista um desenvolvimento óptimo em temperaturas de 35 °C a 46 °C. Quando está presente na água dos rios ou na água corrente, pode transferir-se para as instalações e desenvolver-se facilmente em depósitos de água quente.

No entanto, subindo a temperatura para valores entre 80 °C e os 90 °C, 90% das bactérias são eliminadas a cada 2 minutos. Esta bactéria pode ainda ser facilmente eliminada por correcta adição de cloro na água. Em águas não sanitárias pode ser utilizado o DBNPA (dibromonitrilopropio-namida), biocida que actua por oxidação e que é menos corrosivo que o cloro para as instalações.

Existem diversas variedades de *Legionella*. A *Legionella Pneumophila* é a que representa perigo para a saúde caso seja inalada. Esta situação ocorre quando se formam aspersões de água infectadas com *Legionella Pneumophila*. Os sintomas são semelhantes aos da pneumonia, mas as pessoas infectadas devem ser tratadas de modo particular. O limite de concentração admissível pelo RSECE de *Legionella* é de 100 UFC/l. A VDI 6022 [3.40] considera concentrações máximas em humidificadores da totalidade de microorganismos de 1.000 UFC/ml, sendo que de *Legionella* o máximo é de 1.000 UFC/l. Em sistemas de arrefecimento evaporativo, o valor máximo de microorganismos é de 10.000 UFC/ml, considerando-se aceitável uma concentração de *Legionella* até 10.000 UFC/l.

3.3.3 Materiais poluentes

As concentrações de COV no ambiente interior podem ainda ser influenciadas pelos processos directos e inversos de absorção e adsorção dos materiais constituintes.

Se m_{COV} for a massa de COV num material, C_i a concentração de COV no ambiente, k_a a taxa com que os COV são absorvidos e k_d a taxa de difusão dos COV para o exterior do material, então a variação de m_{COV} no material pode ser expressa como:

$$\frac{d m_{COV}}{dt} = k_a \cdot C_i - k_d \cdot m_{COV} \quad (3.28)$$

Outros modelos de equilíbrio consideram ainda o processo de difusão dos COV na camada de tinta e a emissão para o ambiente [3.41]. Os materiais higroscópicos têm geralmente k_a elevados. Revestimentos de materiais higroscópicos, associados a uma

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

humidade relativa na gama de conforto, contribuem para um ambiente interior saudável. Este ambiente é claramente favorecido pela utilização de materiais de baixo conteúdo de COV. O Dec. Lei 181/2006, transposto da directiva europeia 2004/42/CE, prescreve valores-limite de emissões relativos a tintas e vernizes. Este decreto impõe emissões máximas para tintas de base aquosa ou solvente, com patamares faseados em Janeiro de 2007 e Janeiro de 2010.

Solventes, tintas, colas, selantes, isolantes térmicos, produtos à base de madeira e outros produtos de uso doméstico têm materiais poliméricos na sua constituição. Estes materiais contêm COV, cuja concentração decai com o tempo de modo exponencial, tal como expresso na equação (3.28). No entanto, a resolução desta equação depende do conhecimento de parâmetros de difícil estimativa, já que os valores das emissões são muito variáveis entre produtos aparentemente análogos, seja pela constituição, seja pelo número de anos de utilização do material [3.42]. As relações de emissões entre materiais podem ser superiores a 1/1.000. Testes de emissões de diferentes revestimentos de vinil para o chão, com idades de meio ano a dois anos, mostraram emissões de 91 a 22.280 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; uma cadeira de secretária pode ter uma emissão de 1.060 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ no primeiro dia após fabrico e após 40 dias ter apenas 100 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; painéis de gesso de diferentes fabricantes podem ter emissões variáveis entre 44 e 1.450 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$.

A escolha dos materiais e de tecnologias locais conhecidas, de uso tradicional, podem muitas vezes, corresponder a ambientes interiores salubres, termicamente confortáveis [3.43].

Finalmente, é necessário compreender que a reacção humana aos poluentes varia com o material e fonte poluidora. A resposta à variação de concentração de bioefluentes humanos é menor do que a resposta à concentração de outros poluentes. Assim, aumentar o caudal de ventilação para diluição de bioefluentes humanos melhora a aceitabilidade do ambiente, mas menos do que quando é aumentado para remoção de outros poluentes. Depreende-se que, quando se utiliza a resposta humana a bioefluentes como base para definir a taxa de ventilação, se subestima a resposta global a um aumento de caudal de ar. Assim, aumentar a taxa de ventilação, melhora em especial a aceitabilidade à poluição de materiais muito poluentes, nomeadamente carpetes de *nylon*, coberturas de chão sujas ou filtros usados [3.44].

3.3.4 Taxa de ventilação

Designa-se por taxa de ventilação o caudal de ar exterior, também designado por ar novo, introduzido nos espaços. Este caudal é calculado com base no número de pessoas, áreas servidas ou volume desses espaços. A taxa de ventilação vulgarmente determinada é função do número de pessoas, com o valor típico em ambientes de escritórios de 10 l/(s·ps).

A ASHRAE 62 de 1989 referia valores de taxa de ventilação de 7 a 9,4 l/(s·ps). As versões seguintes da norma passaram a expressar o objectivo de obtenção de ambientes

Funções em Climatização

com QAI aceitável. A norma entrou então em fase de revisão, tendo havido uma profusão de contributos, que determinaram que passasse a ser referida como em constante revisão, incorporando-se para o efeito a letra R no nome da norma (ASHRAE 62R). Com base nesses contributos, a norma foi dividida para aplicação a edifícios residenciais de pequena dimensão, originando a ASHRAE 62.2, e para aplicação a todos os outros edifícios sendo criada a ASHRAE 62.1. Esta norma é aplicável, a edifícios de serviços, residenciais com diversos pisos, laboratórios e indústrias.

Nas versões de 1989 e de 2001, o caudal 10 l/(s·ps) era definido como típico para aplicações de escritórios. Utilizando a equação (3.24), tomando 1.000 ppm como concentração interior desejável de CO₂, tomando a concentração exterior de CO₂ de 480 ppm e a geração de 19 l_{CO2}/h por pessoa, obtém-se cerca de 10 l/(s·ps). A partir da versão de 2001, a ASHRAE 62.1 passou a incorporar adendas sobre construção e arranque de instalações, operação, manutenção e limpeza. A gestão da qualidade do ar passou também a considerar a carga de poluição presente nos espaços.

Deste modo, a ASHRAE 62.1-2004, assim como a versão de 2007¹⁶, prescrevem o caudal de ar novo com base no número máximo de pessoas P e na área A_p ocupada. Às pessoas está associado um caudal por pessoa, R_p, e à área um caudal por unidade de área, R_a. Inclui-se ainda um factor de diversidade de ocupação D, que contabiliza a variabilidade de ocupação dos espaços.

O modelo adoptado considera que os contributos para a poluição interior provenientes das pessoas e dos espaços devem ser somados, utilizando-se a equação:

$$qv = (D \cdot \sum R_p \cdot P + \sum R_a \cdot A_p) \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (3.29)$$

A eficácia de ventilação, ϵ , pode ser obtida pela equação (3.25), ou estimada em fase de projecto. Em situações de insuflação e de extracção pelo tecto, a eficácia de ventilação é estimada em 1 para a situação de arrefecimento e em 0,8 em modo de aquecimento.

Os valores aconselhados por esta norma originam geralmente caudais volúmicos inferiores ao da versão anterior da norma. Na norma actual, a taxa de ventilação por pessoa, para a maioria das aplicações, varia entre 2,5 e 3,8 l/(s·ps). Para aplicações típicas, utilizando os valores recomendados para R_p e R_a obtém-se caudais de cerca de 6 l/(s·ps) para escritórios.

¹⁶ A versão de 2007 completa a de 2004 com as adendas de “a” a “h”.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Estes valores são geralmente inferiores aos recomendados pelas normas. A norma EN 15251 classifica a QAI em quatro categorias, de I a IV, equivalentes às categorias definidas na norma EN 13779 [3.45], IDA 1 a IDA 4. A categoria II é, por defeito, aquela que deve ser considerada na generalidade dos projectos. A EN 13779 prescreve ainda as características para conforto térmico e acústico. Estas características são seguidas de modo geral na EN 15251, como parâmetros de projecto necessários à avaliação do desempenho energético do edifício.

O cálculo da taxa de ventilação é recomendado pela EN 15251 segundo três métodos possíveis: considerando o contributo conjunto das emissões de bioefluentes e de emissões do edifício; considerando a maior contribuição de cada uma das emissões referidas; ou controlando a concentração de CO₂.

Para o primeiro método é utilizada uma expressão equivalente à equação (3.29). No Quadro 3.3. são indicadas as taxas de renovação para a diluição dos bioefluentes e as taxas de diluição da poluição emitida por tipos de edifícios. A norma permite a definição do caudal exterior por pessoa, por área servida ou por qualquer ponderação das duas contribuições.

	Caudal de ar exterior por pessoa [l/(s·ps)]	Caudal de ar exterior por área de edifício [l/(s·m ²)]		
Categoria EN 15251	Com apenas bioefluentes	Muito Baixa Poluição	Baixa Poluição	Outros
I	10	0,5	1,0	2,0
II	7	0,35	0,7	1,4
III	4 ¹⁷	0,2 ¹⁸	0,4	0,8
IV	<4	N.A.	N.A.	N.A.

Quadro 3.3. Caudal de ar exterior para diluição de bioefluentes e poluentes do edifício, segundo a EN 15251

Os caudais de diluição dos bioefluentes definidos na EN 13779 diferem ligeiramente dos indicados na EN 15251. No Quadro 3.4. apresenta-se os valores recomendados por esta norma, para as quatro categorias de qualidade do ar em espaços sem fumadores.

		Caudal de ar exterior	
Categoria EN 13779	Designação	Gama típica [l/(s·ps)]	Valor por defeito [l/(s·ps)]
IDA 1	QAI Elevada	>15	20
IDA 2	QAI Média	10 a 15	12,5
IDA 3	QAI Moderada	6 a 10	8
IDA 4	QAI Baixa	<6	5

Quadro 3.4. Caudal de ar exterior para diluição de bioefluentes segundo a EN 13779

¹⁷ Sem informação no original da tabela B.1 da norma. Utilizado o valor da tabela B.3 da mesma norma.

¹⁸ Valor da tabela B.2 e B.3. Diferente na secção B.1.2.

Funções em Climatização

Os caudais obtidos para edifícios de categoria II pela aplicação das normas referidas são substancialmente superiores aos definidos na ASHRAE 62.1. O RSECE estabelece caudais típicos de 8,3 a 10 l/(s·ps), prevendo-se 16,7 l/(s·ps) se existirem fumadores. Se os materiais de acabamento não forem ecologicamente limpos, o caudal de ar novo deverá ser incrementado em 50%.

As normas referidas permitem ainda definir os caudais de ar exterior com base na diferença entre a concentração interior e exterior de CO₂. A norma EN 13779 define para a categoria IDA 2 uma diferença de concentrações entre 400 a 600 ppm, com o valor típico de 500 ppm. Este valor é igualmente referido na EN 15251. A ASHRAE 62.1-2007 refere 700 ppm para esta diferença, valor necessário à satisfação da maioria das pessoas que entrem num espaço, relativamente à existência de bioefluentes.

A percentagem de pessoas insatisfeitas, PI, pode ser obtida da concentração de CO₂ em ppm, acima da concentração exterior, C*.

O relatório CR 1752 [3.46] apresenta a expressão seguinte:

$$PI_{CO_2} = 395 \cdot \exp(-15,15 \cdot C_{CO_2}^{*-0,25}) \quad (3.30)$$

Em alternativa, apresenta uma expressão para a percentagem de pessoas insatisfeitas em função do caudal de ventilação qv em l/(s·ps):

$$PI_{qv} = 395 \cdot \exp(-1,83 \cdot qv^{0,25}) \quad (3.31)$$

Este relatório, pretendia ainda documentar a qualidade dos ambientes interiores nas vertentes térmica, acústica e de QAI. Indicava a classificação da qualidade do ar ambiente em três categorias a que corresponderiam 15%, 20% e 30% de insatisfeitos. Estas categorias foram posteriormente seguidas pela norma EN 15251, a que corresponderiam os mesmos caudais de ventilação. O relatório referido apresentava a abordagem de Ole Fanger (1988) sobre qualidade do ar. Fanger pretendeu associar uma unidade física à percepção humana da qualidade do ar. Definiu como unidade de poluição o olf, correspondente aos bioefluentes libertados por um indivíduo adulto, médio, com trabalho sedentário, em conforto térmico e com cuidados de higiene equivalentes a 5 banhos por semana. A diluição desta carga de poluição por um caudal de ar novo de 10 l/s originaria uma percepção sensorial, designada por decipol.

A poluição do edifício poderia igualmente ser obtida por um conjunto de pessoas, designado por painel sensorial. Em experiências recentes de avaliação sensorial de um edifício de serviços, obteve-se $0,11 \pm 0,09$ olf/m², resultado que corrobora os valores de 0,1 a 0,2 olf/m² definidos pela CEN CR 1752 para edifícios com baixa emissão de poluentes. Na

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

experiência referida, foi utilizado um painel de pessoas inicialmente não treinadas, que realizaram previamente testes olfactivos de modo a classificar concentrações de 10, 80, 320 e 1.280 ppm de n-butanol. Com as 80% pessoas que passaram os testes de identificação foram realizados os testes de quantificação da poluição do edifício [3.47]. Esta quantificação é realizada de modo indirecto, dado que o painel de pessoas identifica uma medida sensorial, o decipol, que é convertida em olf sabendo-se a taxa de ventilação dos espaços.

Os estudos sensoriais são, no entanto, o único modo de avaliar a resposta humana aos poluentes. Por exemplo, em outro estudo recente conduzido por Fanger com um painel de 30 senhoras num escritório simulado, verificou-se que a redução da carga de poluição em 2 a 2,5 vezes é equivalente ao aumento do caudal de ar novo para o triplo. Só se pode obter este tipo de conclusões avaliando a percepção humana da qualidade do ar [3.48].

Foram realizados diversos trabalhos nesta linha de investigação, mas o método nunca acolheu grande aceitação pela dificuldade de quantificação da carga de poluição. Este método foi referido na prEN 13779, mas não foi contemplado na edição da norma respectiva em 2007.

A qualidade do ar interior é também influenciada pela concentração exterior. Em áreas poluídas, o caudal de ar novo deverá ser incrementado ou depurado. No entanto, na generalidade das situações o ar exterior é de melhor qualidade do que o ar interior.

O local de tomada do ar novo é muitas vezes determinante na qualidade do ar exterior introduzido no edifício. Deverá ser situado em zonas abertas e elevadas, orientadas na direcção dos ventos dominantes. Em casos especiais poderão ser tomadas medidas especiais de filtração ou de descontaminação.

O relatório CR 1752 classifica o ar exterior em três categorias, sendo a intermédia a de cidades com boa qualidade do ar. Nestes casos, o ar exterior terá uma concentração de CO₂ de 700 mg/m³ e de partículas de 40 a 70 µg/m³. Considera ainda as concentrações de CO, de NO₂ e de SO₂.

A norma EN 13779 classifica igualmente o ar exterior em três categorias, ODA 1 a ODA 3. A classificação ODA 1 considera as directivas da OMS e da EC, relativas ao SO₂, O₃, NO₂ e PM₁₀. Se as concentrações excederem os limites indicados para ODA 1 em até 50%, enquadram-se na qualidade ODA 2, caso contrário, na ODA 3. Tomando igualmente o caso das partículas PM₁₀ na categoria ODA 1, a norma estabelece o valor da média anual de 40 µg/m³, com um máximo da média diária de 50 µg/m³ excedível em 35 dias por ano. Exceptuando este caso, as concentrações de SO₂ e de NO₂ presentes na EN 13779 para a categoria ODA 1 aproximam-se das propostas da CR 1752 para a classe de menor qualidade de ar exterior.

Em termos de partículas PM₁₀, a ASHRAE 62.1, citando a EPA, impõe um máximo de 50 µg/m³ de média anual, com um máximo de 150 µg/m³ para a média diária, não excedível a

Funções em Climatização

mais de uma vez por ano. Caso as condições locais excedam estes valores, o ar exterior deverá ser depurado.

Finalmente, a taxa de ventilação de um local depende do número de pessoas presentes nos espaços. A EN 13779 indica 10 m²/ps em escritórios com gabinetes e 12 m²/ps em escritórios amplos. A versão anterior da mesma norma indicava os mesmos valores típicos, considerando para o primeiro uma gama típica de variação de 8 a 12 m²/ps e para o segundo de 7 a 20 m²/ps. Muito embora estes sejam valores típicos, existem assimetrias de ocupação de espaço em regiões e países diferentes. Segundo a Cushman & Wakefield, na Europa Ocidental Norte, com excepção do Reino Unido e a Irlanda, a média da área por pessoa em ambiente de escritórios é de 13,7 m², valor que decai para 10,9 m² na Europa de Leste e para 12,4 m² na Europa do Sul.

O aumento das taxas de ventilação está normalmente associado a uma melhoria da qualidade do ar, mas em detrimento do preço da factura energética. No entanto, o aumento do caudal de ar novo pode, eventualmente, ter um duplo efeito positivo. A utilização de sistemas passivos, associado a um controlo de temperatura de conforto adaptativa, no intervalo entre os 18 °C e os 30 °C, e a sistemas de ventilação natural permite alcançar esse duplo objectivo. Na realidade, existe na Europa um elevado potencial de arrefecimento gratuito por aproveitar, com a aplicação de ventilação natural [3.49]. Entre diversas técnicas para a aplicar, encontram-se as novas tecnologias de janelas, que associam o controlo de radiação ao controlo de ventilação natural [3.50].

3.3.5 Filtros

A classificação de filtros é fundamentalmente determinada pela percentagem de retenção de partículas de determinados diâmetros, ou eficiência de filtração. A relação entre as partículas que atravessam o filtro pelas que o atingem designa-se por “penetração do filtro”. Contribuem ainda para a classificação dos filtros a percentagem de retenção gravimétrica, designada por arresto, a massa total retida quando o filtro está colmatado e a perda de carga máxima.

As normas ASHRAE 52.2 e EN 779 permitem enquadrar estas classificações [3.51].

Os testes relativos a esta última norma utilizam um aerossol de partículas sintéticas, de DEHS, medindo-se com um contador óptico a percentagem de captação de partículas de dimensão de 0,4 µm, emitidas para um fluxo de ar que passa no filtro. Uma eficiência média de filtração durante o ensaio inferior a 40% determina que o filtro é das classes G. Nestas classes de filtros, o teste termina quando a perda de pressão atinge 250 Pa. A classificação é progressiva da classe G1 à G4, em função da percentagem gravimétrica de poeiras que são captadas no filtro.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Os filtros F5 a F9, de maior eficiência de filtração, são sujeitos ao mesmo tipo de teste, que termina aos 450 Pa. O filtro F9 deverá ter uma eficiência superior a 95%. Nas classes F, as partículas são contadas em intervalos de tamanhos, caracterizados pela média geométrica dos diâmetros inferior e superior do intervalo considerado. É igualmente realizada a medição gravimétrica, mas a definição da classe do filtro depende da percentagem de partículas retidas do intervalo correspondente ao diâmetro de 0,4 μm .

A ASHRAE 52.2 segue um procedimento análogo, onde as partículas são de cloreto de potássio, KCl, caracterizando-se o filtro pela menor eficiência medida, MERV, em três gamas de dimensões das partículas, 0,3 μm a 1 μm , 1 μm a 3 μm e 3 μm a 10 μm . Ao contrário da norma EN 779, não existe um procedimento para evitar as cargas electrostáticas.

Do exposto, depreende-se que dois filtros da mesma classe, mas de fabricantes diferentes terão, provavelmente, eficiências diferentes em função do diâmetro das partículas.

A EN 13779 indica as classes de filtração para o ar novo, consoante a qualidade do ar exterior local e a qualidade pretendida para o ar interior. O quadro seguinte resume os níveis de filtração aconselhados:

Qualidade do ar exterior	Qualidade do ar interior			
	IDA1	IDA2	IDA3	IDA4
ODA1	F9	F8	F7	F5
ODA2	F7+F9	F6+F8	F5+F7	F5+F6
ODA3	F7+GF ⁽¹⁾ +F9	F7+GF ⁽¹⁾ +F9	F5+F7	F5+F6

Quadro 3.5. Filtros de ar segundo a EN 13779

⁽¹⁾ filtro de carbono e/ou filtro químico

Um pré-filtro, preferencialmente de uma classe G, deve ser usado na entrada da unidade de ventilação para reduzir a massa de poeiras que entram no sistema. Quando forem utilizados filtros de classe F7 ou superior, deve tomar-se especial atenção às alterações ao caudal provocadas pelo aumento da perda de pressão. Os filtros de carbono são recomendados em áreas de categoria ODA 3. Estes filtros devem ser combinados a jusante com filtros F7. Note-se que a classificação do ar exterior em ODA 2 ou 3 pode não depender da concentração de partículas no ar. Deste modo, uma classe de filtros de maior eficiência pode ser exigida por esta norma, sem que tenha efeitos relevantes sobre o poluente a controlar do ar atmosférico. Esta opção tem a favor o facto de existirem diversas reacções de poluentes do ar com as partículas retidas pelos filtros. Nomeadamente, existem reacções de oxidação com o ozono, que originam compostos mais perigosos que os presentes no ar atmosférico [3.52].

Para situações de conformidade da qualidade do ar exterior, a ASHRAE 62.1 indica a utilização de filtros MERV 6, sensivelmente equivalentes ao G3 ou G4.

Funções em Climatização

Historicamente, os filtros foram usados nos sistemas de climatização para protecção de baterias e de outros órgãos dos sistemas AVAC. Hoje considera-se que para além desta função devem também prevenir efeitos adversos na saúde dos ocupantes dos edifícios. Esta nova função em alguns casos é realizada de forma contra producente. Note-se ainda, que a utilização de filtros da classe F permite, geralmente, obter concentrações mássicas de partículas no interior do edifício inferiores às concentrações do ar exterior.

O próprio filtro, quando sujo, é uma fonte de poluição. Em particular, permitem o crescimento de fungos, que têm consequências adversas na qualidade do ar interior.

No entanto, de acordo com uma experiência no âmbito do projecto AIRLESS, parece que as percepções sensoriais a filtros sujos não dependem dos microorganismos retidos nos filtros, já que os resultados foram equivalentes com filtros sujos, esterilizados, e não esterilizados [3.53]. Os materiais dos filtros podem também contribuir negativamente para a qualidade do ar interior. Reacções sensoriais adversas à permanência num edifício podem estar associadas a filtros de poliéster ou sintéticos. Para o efeito foram tomadas distribuições semelhantes de filtros MERV, por tipo de material constituinte do filtro. Cerca de 15% a 54% das reacções podem ser evitadas, substituindo os filtros dos materiais referidos por filtros de algodão, celulósicos, ou de fibra de vidro [3.54].

Finalmente, relativamente à retenção de bactérias, foi realizado um estudo em que foram avaliadas dez unidades de tratamento de ar com sistemas de filtração. A remoção máxima de bactérias foi de 73,9%, devido à baixa eficiência dos sistemas avaliados a partículas de dimensões de 0,5 a 2 μm . As próprias unidades que comportam os filtros podem ser potenciadoras do desenvolvimento de microorganismos. No mesmo estudo, identificou-se elevadas concentrações de bactérias de 29 UFC/cm² e de fungos de 137 UFC/cm² nas referidas unidades de tratamento de ar [3.55].

3.3.6 Funções associadas à QAI

Do exposto nas secções anteriores, conclui-se que as seguintes funções são necessárias:

- Garantir a diluição da poluição;
- Garantir o controlo de partículas.

3.4 Produtividade, Conforto e QAI

O conforto e a qualidade do ambiente presentes num espaço permitem melhorar o desempenho dos seus ocupantes. Em especial na última década, têm-se discutido quais os ganhos de um correcto ambiente interior ou, em alternativa, as perdas provocadas por um ambiente interior deficiente.

Com o aumento da remuneração do factor trabalho, diversas melhorias das condições de conforto e de QAI passaram a ter rentabilidade. Por exemplo, melhorias no desempenho dos ocupantes de um edifício em 3% são, anualmente, superiores ao investimento inicial em todo o sistema de ventilação do edifício. Esta realidade tem tido difícil aceitação nos investidores, quer pela dificuldade de comprovação das melhorias de desempenho, quer porque outras medidas de carácter psicológico ou sociológico têm maiores efeitos nesse desempenho.

Considerar-se-á de seguida as medidas relativas às condições de conforto ou à qualidade do ar que possam influenciar a produtividade. Note-se que as condições de conforto óptimo não têm necessariamente de coincidir com as do máximo de produtividade. Por outro lado, a melhoria da produtividade com os tipos de medidas referidas, depende do tipo de trabalho realizado. É comum separar o trabalho de escritório entre trabalho repetitivo de cópia ou em trabalho pensante. Kosonen (2204) obteve as seguintes expressões de perda de produtividade Y em função do índice VMP.

Para o trabalho pensante, obteve a seguinte expressão, válida para VMP no intervalo de -0,2 a 1,2:

$$\text{PdPt} = 1,5928 \cdot \text{VMP}^5 - 1,5526 \cdot \text{VMP}^4 - 10,401 \cdot \text{VMP}^3 + 19,226 \cdot \text{VMP}^2 + 13,389 \cdot \text{VMP} + 1,8763 \quad (3.32)$$

E para trabalho de cópia de textos:

$$\text{PdPt} = -60,543 \cdot \text{VMP}^6 + 198,41 \cdot \text{VMP}^5 - 183,75 \cdot \text{VMP}^4 - 8,1178 \cdot \text{VMP}^3 + 50,24 \cdot \text{VMP}^2 + 32,123 \cdot \text{VMP} + 4,8988 \quad (3.33)$$

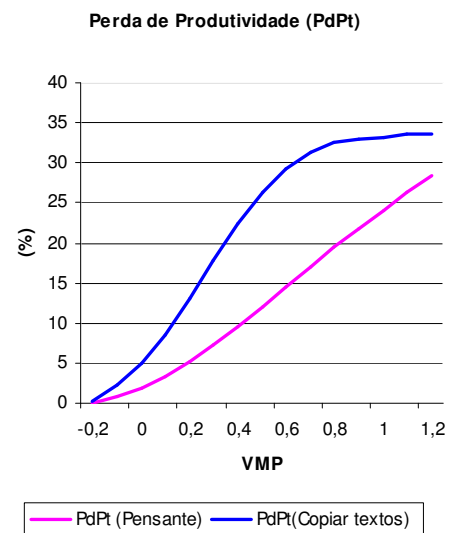


Figura 3.2. Variação da produtividade com VMP

Funções em Climatização

Estas expressões são representadas na Figura 3.2. Como se verifica, o índice VMP para o qual as perdas de produtividade são nulas, será próximo de -0,2. Este valor corresponde a cerca de 24 °C, para um ocupante em trabalho sedentário, com roupa correspondente a um isolamento de 0,5 clo, num ambiente com velocidade residual de 0,1 m/s. Pela observação da mesma figura, verifica-se que a gama de grande conforto, com VMP entre -0,5 a +0,5, contém valores muito díspares de perdas de produtividade. Valores de VMP de +0,5 correspondem a perdas de produtividade, em trabalho de cópia, de 25%. Note-se ainda que as perdas de produtividade do trabalho repetitivo variam mais com o índice VMP do que as perdas de produtividade de trabalho pensante [3.56].

O correcto ambiente interior tem, portanto, uma elevada importância na produtividade dos seus ocupantes. Muitas pessoas afirmam que estariam dispostas a pagar¹⁹ quantias superiores aos encargos médios que a empresa suporta com as doenças dos seus funcionários, para permanecer em ambientes mais saudáveis.

Diversos estudos têm relacionado as condições ambientes com a produtividade. Recentemente, estudos realizados em escolas constataram que os alunos apresentam maior velocidade de conclusão de tarefas quando permanecem em ambientes na gama de temperaturas entre os 20 °C e os 23 °C. De 20 °C para 26 °C, a velocidade de execução de tarefas numa sala de aula reduz-se em 10%. No entanto, não há correlação entre a temperatura do local e o número de erros cometidos em diversas provas, ou seja, o trabalho pensante não é afectado pela temperatura do ambiente.

Um outro estudo realizado em 24 escritórios determinou 21,8 °C como sendo a temperatura ideal de trabalho [3.57].

Outro ainda propôs, após análise de vários estudos, que o máximo de produtividade estaria na gama de 21 °C a 25 °C. Acima dos 25 °C prevê uma redução da produtividade de 2% por cada grau Celsius de aumento da temperatura [3.58].

Há ainda a considerar a actuação dos ocupantes do edifício sobre o sistema de climatização. Verificou-se, num estudo efectuado em 27 escritórios de 13 edifícios na Finlândia, que os termóstatos de controlo de temperatura raramente eram utilizados. Em situação de desconforto, as pessoas ajustavam a roupa, abriam janelas, portas, contactavam a manutenção do edifício, bebiam uma bebida quente, mas não ajustavam a posição do termóstato [3.59].

Outro aspecto a considerar na produtividade é o espaço ocupado por pessoa. O absentismo, definido como a percentagem de horas anuais de trabalho não efectuadas, é fortemente influenciado pelo espaço disponível para cada pessoa e pela taxa de ventilação.

¹⁹ WTP(Willing to Pay), na literatura anglo-saxónica.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Quando a área disponível passa de 10 m²/ps para 30 m²/ps, mantendo-se a taxa de ventilação em 10 l/(s·ps), o absentismo reduz-se de 2,5% para 2%. Por outro lado, fixando a área disponível em 10 m²/ps e duplicando o caudal de ventilação de 10 l/(s·ps) para 20 l/(s·ps), o absentismo baixa de 2,5% para 1,9% [3.58]. Para esta mesma variação do caudal de ventilação, o estudo referido em [3.57] indica um aumento de produtividade de 1,1%.

Outros estudos relacionam a produtividade com os índices de insatisfação com a qualidade do ar. Estima-se que um decréscimo de 10% no número de pessoas insatisfeitas, quando existe uma baixa qualidade do ar que origine 70% de pessoas insatisfeitas, corresponde a melhorar a produtividade em 1,4% se o trabalho for escrever à máquina, 1,1% em formulação de adições e de 2,3% em revisão de textos. Deve ainda realçar-se que aumentando-se a taxa de ventilação, os valores associados às melhorias de produtividade são 10 a 100 vezes superiores aos custos de operação e de manutenção, sem que os encargos subam substancialmente. Para um aumento da taxa de ventilação de 5 l/(s·ps) para 10 l/(s·ps) pode haver um acréscimo no consumo de energia de apenas 10% [3.60].

Um estudo equivalente foi publicado por Pawel Wargocki (2000), no qual se relacionavam as categorias dos edifícios e a percentagem de insatisfeitos associados às variações de produtividade. O Quadro 3.6 resume esses resultados:

Qualidade do ar (CEN CR 1752)		Percentagem de melhoria relativamente à categoria C		
Categoria	PPI (%)	Cópia de texto	Adição	Leitura
C	30	---	---	---
B	20	0.4	1.1	2.3
A	15	2.1	1.6	3.4

Quadro 3.6. Melhoria da produtividade relativa à categoria C de edifícios segundo CR 1752

Num estudo recente do mesmo autor, mostrou-se que o aumento do caudal de ar e a redução da temperatura até valores próximos de 20 °C melhoram a velocidade de realização de diversas operações. Com o aumento da taxa de ventilação de 4 l/(s·ps) para 10 l/(s·ps), esta velocidade aumenta em 10%, mas os erros cometidos aumentam cerca de 2%; um aumento no desempenho ligeiramente inferior ocorre quando a temperatura é reduzida de 24 °C para 20 °C, mas neste caso não há variação dos erros cometidos [3.61].

Ao invés, em escolas com deficientes condições de ventilação ocorrem maus resultados. É comum atingir-se concentrações de CO₂ de 4.000 ppm, nos períodos de ocupação, que se relacionam com os maus resultados referidos [3.62].

Todos estes estudos sobre produtividade são de grande importância, já que nas sociedades ocidentais o custo de mão-de-obra é, provavelmente, a parcela de maior custo nas empresas. Quando a variação de produtividade de 1%, que como visto anteriormente pode advir do aumento da taxa de ventilação ou das correctas condições térmicas,

Funções em Climatização

corresponde a um ganho superior a todos os custos de exploração do sistema de ar condicionado, há que considerar qual o investimento adstrito a estes sistemas [3.60].

Uma situação similar ocorre em Portugal. O encargo médio de cerca de 30.000 pessoas, que trabalhavam na CGD, Galp energia e EDP-Distribuição, em 2001 e 2002, foi de 35.000²⁰ €/(ano·ps). Este valor é a média de todos os encargos dos trabalhadores destas empresas, que se supõe serem uma imagem daquelas em que a generalidade dos funcionários trabalha em escritórios com ar condicionado e ventilação. Nestes espaços, o aumento do caudal de ar novo, na fase inicial do investimento, de 10 para 20 l/(s·ps) aponta para um aumento de cerca de 10% no investimento inicial da empreitada de ar condicionado e um *pay-back* inferior a um ano, obtido dos aumentos de produtividade [3.63].

Para além do caudal de ar de ventilação, os poluentes interiores podem contribuir decididamente para a produtividade. Um elemento de poluição a considerar é o próprio sistema de filtração. As eventuais perdas de produtividade causadas por poluentes emitidos pelos filtros são substancialmente inferiores aos benefícios da filtração obtida. Wargocki (2004) verificou uma redução média de 10% nos tempos das chamadas dos operadores de um centro de atendimento, quando a substituição de filtros se realizava de 6 em 6 meses. Wyon (2000) afirmou que a substituição dos filtros das UTAs permitia uma melhoria da produtividade de 5,7%, com base na estimativa pessoal de cada ocupante de edifícios de escritórios.

A substituição dos filtros implica que sejam gastas horas de trabalho em manutenção, mas que permitem ganhos substanciais na redução do absentismo. Num edifício que utilizava uma UTAN com um caudal de ar novo de 10 m³/s, estimou-se serem necessários 2 a 6 dias·homem para trabalhos de substituição dos filtros, compensados no entanto com a redução de 3,6 a 86 dias·homem de trabalho de limpeza e 0 a 345 dias·homem de absentismo directo ao trabalho [3.64].

Face a todos os considerandos anteriores considerar-se-á, para efeitos das simulações a realizar neste trabalho, temperaturas de conforto no intervalo de 20 °C a 24 °C. Em termos de qualidade do ar opta-se por um caudal de referência de 10 l/(s·ps) afectado da eficácia de ventilação.

²⁰ A média dos vencimentos anuais do trabalhador médio, homem, nos EUA em 2007 foi de 45.113 USD. Este valor foi ligeiramente inferior aos valores de 1997, actualizados a 2007 (US Census Bureau).

3.5 Iluminação e Ruído

Finalmente, há ainda a considerar as condições interiores de iluminação e do ruído ambiente. As funções associadas ao seu controlo estão, no entanto, excluídas das considerações do presente trabalho.

São, no entanto, factores importantes. A produtividade auto-avaliada é maior quando a iluminação depende da luz do dia e quando há possibilidade de visão para o exterior. A utilização de controlo de iluminação é pois uma medida que favorece a redução da factura de energia, já que as pessoas tendem a controlar a iluminação de modo a terem um nível de iluminância nas suas secretárias de cerca de 550 lux. A norma EN 15251 prevê uma iluminância em escritórios de 500 lux. Portugal possui uma possibilidade interessante de aproveitamento da luz do dia, já que tem cerca de 62% do tempo um céu limpo. A França, Suécia e Reino Unido têm valores de céu limpo de cerca de 30% [3.65].

O outro factor a considerar é o ruído, ou melhor a pressão sonora sentida por um indivíduo. Dentro de uma sala, a pressão sonora depende da potência da fonte de emissão, normalmente expressa em dB ou em W. A pressão depende ainda de atenuações da energia do ruído até à entrada da sala e da atenuação da sala e do seu mobiliário. Esta pressão varia com o inverso do quadrado da distância entre a localização da pessoa e o ponto de emissão localizado na sala.

A norma EN 15251 considera 35 dB(A) como valor típico de pressão sonora para pequenos escritórios ou salas de conferência e 40 dB(A) para escritórios individuais ou amplos. A ponderação (A) no espectro de frequências pretende associar a escala obtida com a resposta do ouvido humano, que é menos sensível às baixas frequências.

Existem outros métodos de associação do espectro real às reacções humanas, nomeadamente as escalas NC e NR.

3.6 Mapeamento entre o Domínio Funcional e Físico

Do exposto nas secções 3.2 e 3.3, conclui-se que um projecto de climatização deve considerar as seguintes funções:

- Assegurar as condições térmicas apropriadas;
- Assegurar ambientes interiores saudáveis.

O mapeamento geral para “Climatizar edifício de serviços” é representado Figura 3.3.

Se, no âmbito deste trabalho, se escolher utilizar um sistema de climatização como parâmetro físico, para obter a climatização de um edifício de serviços, restringem-se logo as

Funções em Climatização

funções filhas disponíveis. Do anteriormente enunciado são somente as condições térmicas apropriadas e um ambiente interior saudável. Estas são asseguradas pelos parâmetros físicos relativos ao sistema de climatização activo e ao sistema de ventilação.

Ao primeiro compete a remoção das cargas térmicas internas de modo a garantir uma temperatura interior e uma velocidade residual do ar apropriadas. Por temperatura é entendida a temperatura seca do ar ou, em alguns sistemas, a temperatura operativa. Esta função será realizada pelo sistema de remoção de carga a instalar na sala, ao qual se associa todo o conjunto de redes de fluidos e de máquinas térmicas necessárias.

Por outro lado, a velocidade residual é sobretudo dependente do sistema de difusão de ar instalado na sala.

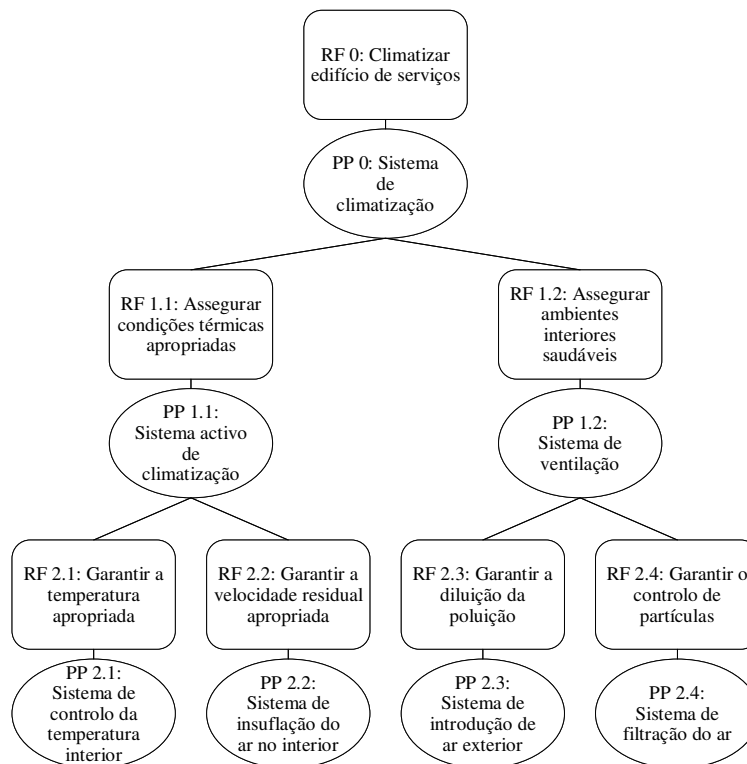


Figura 3.3. Mapeamento entre o domínio funcional e físico, para a função “Climatizar edifício de serviços”

Ao sistema de ventilação compete ainda garantir a diluição da carga de poluição e a filtração do ar. A diluição é obtida pela introdução de ar novo nas salas, cujo caudal poderá ser fixo, variável, ou mesmo dependente de sistemas mistos com ventilação natural e forçada. O controlo de partículas é realizado pelo sistema de filtração, sendo um parâmetro de características físicas idênticas nos diversos sistemas considerados. É introduzido nesta secção por coerência com a exposição das secções anteriores.

Veremos, no capítulo seguinte, que a decomposição apresentada Figura 3.3 é aplicável aos diversos sistemas de climatização considerados.

3.7 Resumo e Conclusões

No presente capítulo, apresentou-se as condições térmicas e da qualidade do ar que devem existir num espaço de escritórios.

Os modelos que descrevem o conforto térmico baseiam-se no balanço térmico do corpo humano ou na possibilidade do corpo humano se adaptar às condições térmicas locais. Neste sentido, enunciou-se o modelo de balanço térmico ao corpo humano, proveniente dos trabalhos de Ole Fanger, introduziu-se o voto médio previsível, VMP, e a percentagem de pessoas insatisfeitas, PPI. Este método é utilizado como critério de conforto na ISO 7730. Segundo este método, a região de grande conforto ocorre para valores de VMP entre -0,5 e +0,5, a que corresponde uma percentagem de indivíduos insatisfeitos de 10%. Diversos trabalhos realizados posteriormente à publicação da norma parecem apontar para uma preferência para ambientes ligeiramente mais frios, a que corresponderia um VMP de cerca de -0,1. Este modelo deve ser aplicado em ambientes de escritório, com trabalhos estáveis, vestuário típico e controlo de temperatura centralizado. A humidade relativa, desde que limitada na gama de 30 a 70%, não interfere significativamente no conforto térmico.

Parece, no entanto, ser menos apropriado para trabalhos com actividade menos estável ou em ambientes de escritórios em climas mais quentes. Os modelos adaptativos, propostos por Humphreys, permitem conjugar a variação de vestuário, a abertura de janelas e o aumento da velocidade residual com uma temperatura seca local mais elevada, mantendo no entanto as condições de conforto.

Há ainda que considerar os efeitos da temperatura na produtividade. Diversos estudos referem máximos de produtividade com valores do VMP inferiores aos de conforto. No entanto, esta conclusão não é consensual, podendo estimar-se uma gama óptima de produtividade entre os 20 °C e os 25 °C. Acresce que a produtividade de trabalho pensante é menos afectada pela variação de temperatura do que o trabalho repetitivo, pelo que é possível utilizar a gama de temperatura referida, sem preocupações excessivas de optimização, nos mais recentes edifícios de serviços.

Os edifícios e seus sistemas devem ainda garantir um ambiente interior saudável. É possível associar a qualidade do ar à concentração de CO₂, quando os bioefluentes humanos constituem uma fonte de poluição apreciável. Nestas condições, a taxa de ventilação de cerca de 10 l/(s·ps) permite normalmente manter a concentração de CO₂ em níveis inferiores a 1.000 ppm, removendo concomitantemente outros poluentes. A norma ASHRAE 62.1 estabelece valores inferiores aos referidos e as normas europeias, valores geralmente superiores.

Funções em Climatização

Nalguns casos, a poluição interior é fortemente dependente das emissões dos materiais de construção ou de mobiliário, pelo que tem existido um esforço regulamentar no sentido de impor normas de fabrico que limitem as emissões dos materiais de construção. Nalgumas situações, a poluição interior depende dos poluentes atmosféricos. No entanto, na generalidade das cidades, mesmo nas mais poluídas, o ar exterior é de melhor qualidade do que a generalidade do ar presente nos espaços ocupados. Neste sentido, a utilização de sistemas adaptativos permite também contribuir para a qualidade do ar interior.

Na normativa europeia, os filtros desempenham um papel importante, no que diz respeito à filtração de partículas e de alguns microorganismos. Esta normativa aconselha a utilização de secções de filtração com filtros de classe mínima F7. Este nível de filtração potencia a ocorrência de ambientes em que existem especialmente partículas de pequenas dimensões, ditas respiráveis.

A produtividade está também associada a ambientes saudáveis, quer pela redução de diversas formas de absentismo, quer pela melhoria do desempenho. O aumento do caudal de ar novo de 10 l/(s-ps) para 20 l/(s-ps) permite melhorar a produtividade em pelo menos 1%. A possibilidade de melhorar a produtividade dos ocupantes dos edifícios, alterando ou melhorando os seus sistemas de climatização tem tido pouca aceitação em muitos investidores, dada a dificuldade da sua comprovação e a possibilidade de actuação noutros factores psico-sociológicos mais rentáveis. Para além da taxa de ventilação, a produtividade depende ainda do espaço disponibilizado por pessoa.

O ruído e a iluminação têm também um papel importante no desempenho dos indivíduos, mas estes factores estão excluídos do âmbito deste trabalho. É de notar que a iluminação natural e o contacto com ambientes naturais favorecem o desempenho individual.

Um conjunto de normas europeias, nomeadamente a EN 15251 e a EN 13779, associadas à referida ISO 7730, enquadram os edifícios em diferentes categorias, no que se refere ao conforto térmico e à qualidade do ar. Estas normas permitem a classificação dos edifícios em classes de qualidade. Estes dois principais desígnios de um sistema de climatização são expressos nas funções relativas a “assegurar as condições térmicas apropriadas” e “assegurar ambientes interiores saudáveis”. A decomposição destas funções, até ao nível comum aos vários sistemas de climatização, leva a escolher os sistemas de controlo de temperatura interior, de difusão do ar no interior, de controlo de insuflação de ar exterior e de filtração como parâmetros para a sua execução física.

3.8 Contributos, Opinião e Prosseguimento

É contributo deste capítulo a apresentação das normas e dos recentes desenvolvimentos relativos ao conforto térmico e à qualidade do ar. Aplicou-se, então, estes conceitos na decomposição da função “climatizar um edifício de serviços”, utilizando para parâmetro de projecto correspondente um sistema de climatização activo. Deste modo, obteve-se a decomposição entre requisitos funcionais e parâmetros de projecto, realizada até ao segundo nível de decomposição, conforme expresso no mapeamento da Figura 3.3. O mapeamento, até este nível, é comum aos diversos sistemas de climatização. Constitui o principal contributo deste capítulo: obter com a aplicação da teoria axiomática o mapeamento base dos sistemas de climatização.

Das apresentações do estado da arte relativas ao conforto térmico e à qualidade do ar, parece-nos razoável supor que ambientes térmicos entre 20 °C e 24 °C, associados a caudais de ar novo superiores a 10 l/(s·ps) originarão ambientes termicamente confortáveis e com boa qualidade do ar. Os sistemas deverão integrar sistemas mistos onde a possibilidade de abertura de janelas, que permita o controlo adaptativo e o arrefecimento gratuito, se integre com os sistemas activos que funcionarão nas situações extremas.

Nesta linha, apresenta-se alguns eixos de desenvolvimento, aplicados à realidade nacional:

- Quantificação dos custos da não produtividade e da factura de energia utilizando sistemas mistos, activos e adaptativos;
- Determinar as variações de produtividade das pessoas em espaços que usem sistemas adaptativos, provocadas pelo aumento da temperatura e pelas variações na taxa de ventilação;
- Determinar as perdas de produtividade associadas a sistemas que impeçam a abertura de janelas, devidas à permanência das pessoas em ambientes pouco naturais;
- Avaliar a necessidade fisiológica, médica, de sistemas de filtração que mantenham o ambiente interior com uma concertação de partículas inferior à do ambiente exterior;
- Avaliar o nível de contacto humano com partículas e microorganismos que garantam simultaneamente a salubridade dos espaços e o estímulo do sistema imunológico.

Capítulo 4

Sistemas AVAC

“We went at the subject backwards.

A more normal approach, the front way, would have been to humidify the air and control its moisture content at a level higher than in outdoor air.

But here we were, designing a system to hold the moisture content at a specified level that was lower than in air out of doors. We started the hard way.”

Willis Haviland Carrier, sobre o primeiro sistema de climatização, construído para uma editora em 1902.

4.1 Introdução

No capítulo anterior, foram apresentadas as funções necessárias ao utilizador de um sistema de climatização. Realizou-se ainda a decomposição destas funções e respectivos parâmetros de projecto, até um nível comum, à generalidade dos sistemas de climatização. Neste capítulo, serão apresentados alguns dos principais sistemas de climatização, o processo de mapeamento de projecto relativo a cada sistema e os seus fundamentos funcionais. Em particular, analisar-se-á os sistemas de climatização¹ de volume de ar variável (VAV) e os de caudal de ar exterior dedicado. Nestes últimos, integram-se os sistemas com ventiloconvectores (VC) e os sistemas emergentes. Estes, assim designados pela sua relativa novidade, contam com os sistemas radiativos que utilizam tectos arrefecidos (TA) e com os sistemas com unidades de indução (UI). Os sistemas de indução foram usados nos anos 80 como substitutos dos sistemas com VC. Recentemente, foram reabilitados como evolução das vigas arrefecidas, que utilizam a bateria de arrefecimento em convecção natural.

Os sistemas VAV têm grande aceitação nos EUA, onde são quase sinónimo de sistema de climatização. Estão também difundidos na Europa. Os sistemas de VC têm especial utilização nos países do Sul da Europa enquanto os de TA e os de UI têm tido especial desenvolvimento nos países escandinavos.

¹ Também referidos como sistemas AVAC, ou sistemas para aquecimento, ventilação e ar condicionado.

4.2 Topologias de Sistemas AVAC e seu Léxico

Um sistema de climatização é fundamentalmente composto por uma fonte que troca calor com a geosfera, nomeadamente a atmosfera, uma rede de distribuição com um fluido, um dispositivo de movimentação desse fluido e uma carga [4.1].

O sistema é completado com uma câmara de expansão, caso seja necessário absorver as dilatações do fluido.

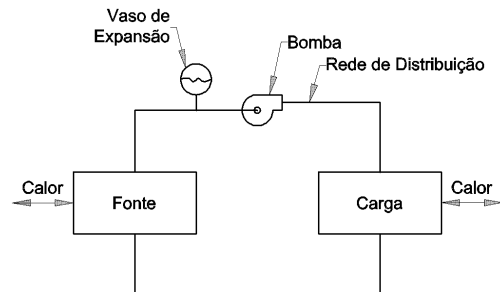


Figura 4.1. Sistema de climatização

Neste trabalho, serão considerados apenas os sistemas de climatização com rede fechada, excluindo-se todos os sistemas em que o processo de arrefecimento ou de aquecimento utilize uma rede aberta. São exemplos desta situação os sistemas de expansão directa de ar atmosférico.

Sem perda de generalidade, serão considerados os sistemas que removem calor dos espaços. Esta remoção de calor será designada, impropriamente por “frio”². Designar-se-á por “produção de frio” o processo de remoção de calor da rede para a atmosfera; ao processo inverso, realizado por uma bomba de calor ou por uma caldeira, por “produção de calor”. Os fluidos serão designados por “fluido frio” ou “fluido quente” consoante estejam a uma temperatura inferior ou superior à temperatura ambiente interior. Será ainda utilizado o termo “consumo de energia” para designar a transformação de uma qualquer forma de energia noutra de menor exergia.

Nas situações correntes de climatização, existe uma máquina frigorífica na fonte, trabalhando de modo isolado ou associada a outras. Estas máquinas são tipicamente de ciclo de compressão, podendo rejeitar o calor para a atmosfera ou para um outro circuito de fluido térmico, normalmente água. Quando funcionam com uma rede de distribuição a água, são designados por máquinas frigoríficas³ “água-água” ou “água-ar”, consoante o modo de rejeição de calor. O calor libertado para uma rede de água é posteriormente lançado na geosfera por permutadores secos, torres de arrefecimento, permuta para rios ou para o solo.

² Neste trabalho serão utilizadas as designações termodinâmicas correntes, aliás, constantes nos decretos-lei do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios.

³ Designadas comercialmente por *chiller*. Neste trabalho adopta-se o acrónimo GPFC, referente a grupo produtor de frio e/ou calor.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Em alternativa, podem ser utilizadas máquinas frigoríficas de ciclo de absorção, que utilizam um fluido refrigerante e uma solução absorvedora. São exemplos comuns a solução de brometo de lítio, em que a água serve de fluido refrigerante, ou a solução de água e amoníaco, em que o amoníaco funciona como refrigerante. Nestas máquinas, a condensação faz-se normalmente para um circuito de água com torre de arrefecimento. Esta opção permite uma maior estabilidade da pressão de condensação, essencial ao bom funcionamento deste tipo de equipamentos.

As máquinas frigoríficas que permitem o aproveitamento do calor libertado para a atmosfera são designadas por máquinas térmicas com recuperação. Nas máquinas frigoríficas água-ar, esta recuperação poderá ser realizada num permutador em paralelo ao condensador que permite remover todo o calor de condensação, designando-se o aparelho por máquina de recuperação total. Em alternativa, a recuperação poderá ser parcial, quando é aproveitado o calor de sobre-aquecimento do gás, normalmente num permutador em série instalado entre o compressor e o condensador.

A eficiência da máquina, medida pela razão entre o calor removido na fonte fria e a energia fornecida à máquina, é designada por EER⁴. Este índice difere do coeficiente de operação, COP, de um ciclo frigorífico, por considerar todos os consumos associados ao seu funcionamento, nomeadamente o consumo no controlo e nos ventiladores. Estes valores são definidos para condições padrão de temperatura exterior e de condições no evaporador. O índice ESEER⁵ tenta quantificar a eficiência média da máquina ao longo do ano, tendo em consideração a eficiência a cargas parciais e a variação da temperatura do ar atmosférico.

A rede de distribuição de fluido pode contemplar simultaneamente fluido frio e fluido quente, caso em que sendo necessárias as tubagens de ida e de retorno para cada um dos regimes de temperatura, se designa a rede a quatro tubos. As redes a dois tubos podem distribuir, em cada momento, apenas fluido térmico frio ou fluido quente. Existem ainda redes a três tubos, em que a tubagem de retorno do fluido frio e quente é comum. O fluido poderá ser água, termofluido, ou refrigerante. Nas redes a água, a bomba é o dispositivo de movimentação do fluido, geralmente aplicada também a redes com termofluido. Nas redes com refrigerante, é normalmente o compressor do ciclo frigorífico que, para além de realizar a compressão, assegura a pressão necessária à movimentação do refrigerante. Quando estes dispositivos permitem variação de caudal, o sistema diz-se a caudal variável.

⁴ EER – Energy efficiency ratio

⁵ ESEER- European Seasonal EER

Até ao momento, os GPFCs necessitam de um caudal razoavelmente constante para funcionarem correctamente. Neste sentido, as redes de distribuição hidráulicas contam geralmente com um circuito primário onde o caudal é mantido constante e com uma rede secundária de distribuição às cargas. A rede secundária poderá ter caudal constante ou variável. No caso de o fluido ser refrigerante, é utilizado o acrónimo VRF⁶.

A carga é constituída pelos equipamentos que trocam calor directamente com o ar ambiente. Estes podem ser unidades centrais de tratamento de ar, ou unidades localizadas junto dos espaços a climatizar.

As centrais de tratamento de ar, ou unidades de tratamento de ar (UTA) podem enviar um caudal de ar tratado para os espaços a climatizar, numa só conduta, sendo então o sistema designado por monoconduta. Menos comum é existir uma rede de condutas com ar frio e outra com ar quente, designando-se então o sistema por dupla conduta. Quando tratam apenas o ar exterior, também designado por ar novo, estas designam-se por unidades de tratamento de ar novo (UTAN). Uma UTA, ou um conjunto de UTAs, pode servir uma só zona, designando-se o sistema por monozona, ou, em alternativa, servir diversas zonas. Uma zona é um conjunto de espaços com condições de climatização semelhantes.

O caudal das UTAs pode ser constante, designando-se também por volume constante, ou variável. Neste caso, o sistema designa-se por volume de ar variável (VAV). Este sistema tem sido particularmente investigado nos EUA, de onde tem surgido a generalidade dos artigos técnicos e científicos sobre o tema.

As unidades utilizadas junto dos espaços a climatizar são denominadas unidades terminais. Estas unidades utilizam normalmente a convecção como mecanismo de transferência de calor, podendo também utilizar a radiação. Os painéis radiantes, normalmente instalados nos tectos, utilizam a radiação como mecanismo de transferência de calor para o ambiente. Por esta razão, são apelidados de tectos radiantes ou, face à sua normal aplicação, de tectos arrefecidos (TA). Os sistemas que utilizam uma bateria de arrefecimento com ventilação forçada são designados por ventiloconvectores (VC); aos sistemas que forçam a passagem do ar por uma bateria, sendo este fluxo obtido por indução de um caudal de ar primário, chama-se unidades de indução (UI). Os sistemas de TA e de UI têm sido designados em artigos de revistas nos EUA por sistemas emergentes, designação que será utilizada neste trabalho. A investigação nos países escandinavos tem ajudado bastante para a sua divulgação.

Existem ainda outras unidades terminais com menor expressão comercial, que não serão abordadas, mas cuja avaliação facilmente se realiza após a leitura deste trabalho.

⁶ VRF- "Variable Refrigerant Fluid"

Deste brevíssimo enunciado de sistemas, facilmente se antevê que as possibilidades combinatórias de fontes, redes de distribuição e cargas permitem originar milhares de sistemas diferentes. Muitos desses sistemas não existem comercialmente, como por exemplo um sistema VRF com tectos arrefecidos, um sistema de absorção com rede de distribuição com vapor de baixa pressão ou um sistema de ventiloconvectores com dupla conduta. Outros, como GPFCs com caudal de água variável no evaporador, estão pouco desenvolvidos. Outros ainda são fisicamente impossíveis de realizar, ou de difícil concretização, como seja o caso de um sistema de indução com caudal de ar primário variável.

Do exposto, subentende-se que a análise dos sistemas de climatização só é realizável se restringida aos sistemas comercialmente existentes. Tomar-se-á como orientação para delimitar a análise o enunciado das funções a desempenhar pelos sistemas de climatização, descrito no capítulo anterior. Sendo estas funções relativas ao desempenho do sistema nos espaços ocupados, usaremos como referência os elementos associados a esses espaços. Assim, aborda-se os sistemas em função do que por ora se designou como cargas. Considera-se então como base para análise, os sistemas VAV, os sistemas com VC, com TA ou com UI, que representam a quase totalidade de sistemas de climatização comercialmente existentes.

Sem perda excessiva de generalidade, iremos considerar neste trabalho que a rede de distribuição utiliza água como fluido de transporte de energia, que essa rede é a dois ou a quatro tubos, que a produção de frio é assegurada num GPFC e que a produção de calor é proveniente da recuperação de calor num GPFC, numa bomba de calor ou numa caldeira. Considera-se ainda que o sistema trata diversos espaços, com diagramas de cargas térmicas diferentes, que implicam a adaptação do sistema às variações destas cargas distintas.

4.3 O Mercado em Portugal

O mercado em Portugal é caracterizado por uma forte presença das mais diversas marcas e sistemas, o que é uma clara indicação da elevada abertura do mercado a todo o conjunto de produtos. A sua maioria é importada, existindo, no entanto, algum relevo no fabrico nacional de unidades de tratamento de ar.

O mercado de AVAC foi, e provavelmente ainda é, um mercado com elevado desenvolvimento, que teve taxas de crescimento próximas dos 10% no início dos anos 2000.

A maioria (58% em 2001) dos GPFCs vendidos é de potência inferior a 100 kW, aplicáveis em pequenas instalações. O sistema típico com GPFCs utiliza arrefecimento a ar do condensador (98% em 2001). No mercado de unidades terminais, há um consumo anual de cerca de 16.000 unidades VC e de 1.000 de outros tipos [4.2].

Muito embora este trabalho pretenda analisar os sistemas na globalidade, há interesse em analisar os sistemas com aplicação em Portugal. Muito embora o sistema como VC seja o mais comum, o mercado português é muito permeável aos diversos sistemas, pelo que a análise geral a sistemas VAV, com VC, com TA ou UI, é aplicável à realidade nacional.

Cada um destes sistemas tem custos diversos de instalação, consoante a carga térmica interna e as exigências funcionais que devam cumprir. Poder-se-á afirmar, numa estimativa qualitativa, que o sistema com menor custo é o de um sistema com VC a dois tubos, que a nível de custos intermédios se encontram os sistemas com UI a dois tubos e os sistemas VC a quatro tubos, e que os de maior custo serão os TA a dois tubos e os VAV. É importante notar que os investimentos em climatização são elevados no contexto do investimento global de construção de um edifício. Por exemplo, o investimento num sistema com VC a dois tubos é superior ao investimento necessário para construir a própria estrutura resistente do edifício.

Malgrado o pesado investimento nos sistemas de climatização, a abordagem técnica que lhes é reservada permite que o sistema não funcione de acordo com os limites funcionais impostos, em diversas situações.

4.4 Sistemas VAV

O sistema VAV surge nos EUA nos anos de 1960, como um sistema de climatização, que adaptando-se às cargas térmicas interiores, tem um baixo consumo de energia. Como a energia consumida na ventilação é proporcional ao cubo do caudal movimentado, qualquer esforço para reduzir o caudal de ventilação implica uma redução significativa no consumo da energia associada. Este princípio é o utilizado para a redução do consumo de energia nos sistemas VAV, nos quais o caudal é adaptado função das cargas térmicas do ambiente.

Como descrição geral, poder-se-á dizer que estes sistemas utilizam uma temperatura de insuflação geralmente constante, variando o caudal insuflado para adaptação às necessidades de remoção de carga térmica. Em modo de arrefecimento, essa temperatura é normalmente de 18 °C. Na abordagem ora considerada, o sistema VAV é monoconduta e a UTA central a quatro tubos. Esta UTA é genericamente constituída pelas secções de filtração, de arrefecimento e de aquecimento, de recirculação, de ventilação e de exaustão. Poderá ser complementada por uma secção de humedificação, ou ainda por secções de recuperação. Existem ainda os registos de admissão de ar, de exaustão e de recirculação. É comum existir pré-filtro de uma classe G na admissão de ar novo e outro na admissão da secção de exaustão. Os filtros, normalmente de uma classe F, são instalados antes das baterias, após a mistura do ar de recirculação com o ar exterior. Por vezes, é ainda instalado um filtro após a secção de ventilação. Um esquema simplificado da instalação é mostrado na pela actuação de um registo na caixa VAV (Cx VAV), que fecha ou abre dependendo das suas necessidades térmicas.

Figura 4.2. O caudal de ar novo AN é admitido do exterior, misturado com ar de retorno, AR, tratado e insuflado.

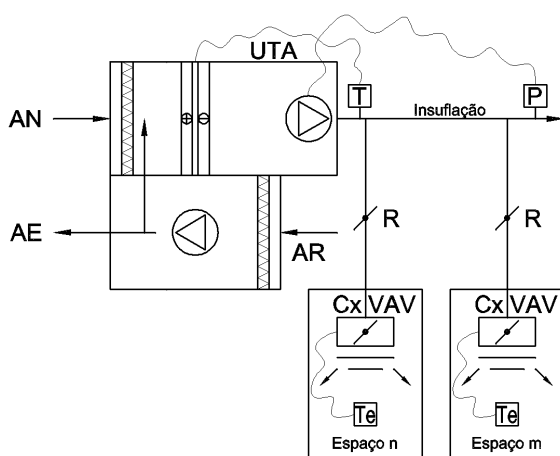


Figura 4.2. Esquema de um sistema VAV

O ventilador de insuflação envia o ar tratado por uma rede de condutas (Insuflação), para os espaços, n e m, onde as caixas VAV regulam o caudal em função da temperatura requerida. Os registos R permitem uma calibração inicial dos caudais. A regulação do caudal insuflado em cada espaço é efectuada pela actuação de um registo na caixa VAV (Cx VAV), que fecha ou abre dependendo das suas necessidades térmicas.

Como resultado da variação conjunta dos caudais nas diversas caixas VAV, o caudal de ar terá de variar na conduta de insuflação. A temperatura de insuflação é controlada em T e, por vezes, o sistema garante uma pressão determinada em P. Um caudal de ar, designado por ar de exaustão, AE, sensivelmente igual ao caudal de ar novo, é lançado no exterior.

4.4.1 Adaptação do sistema VAV à carga térmica

A regulação do caudal na conduta de insuflação é normalmente efectuada por variação da velocidade do ventilador de insuflação, de modo a manter constante a pressão num ponto da conduta. O ventilador de extracção deverá acompanhar a variação de caudal do ventilador de insuflação. Normalmente, não existe em cada sala controlo do caudal de ar de retorno.

Fixando-se a pressão na conduta e, conseqüentemente, a perda de pressão, ΔP , o consumo de energia irá variar directamente com o caudal de ar, em vez de variar com o cubo do caudal. O resultado é uma redução do consumo de energia substancialmente menor do que a possível quando varia o caudal e a pressão. Esta será, porventura, a razão que permite explicar, em alguns casos, as diferenças entre os consumos de energia previstos para os sistemas VAV e os que ocorrem realmente.

No entanto, é possível ajustar o caudal e a pressão ao funcionamento da instalação, desde que sejam conhecidas as cargas térmicas de cada espaço. Conhecidas estas cargas, pode definir-se o caudal a insuflar e, determinando-se a pressão a vencer, decidir-se sobre o ponto de funcionamento do ventilador. Um programa central determina as cargas, utilizando para o efeito o valor do caudal e da temperatura do ar de insuflação, que são medidos em cada caixa VAV. O caudal pode ser medido localmente por equipamento apropriado, ou apenas estimado com base na posição de cada registo e do caudal total da instalação.

Com o objectivo de reduzir as perdas de pressão nas caixas VAV, pretende-se que o algoritmo de controlo permita que pelo menos uma caixa VAV tenha o registo totalmente aberto. Este objectivo pode ser alcançado, ajustando em conformidade, o ponto de funcionamento do ventilador em função da soma dos caudais das caixas VAV. Em alternativa, o sistema pode ser controlado pela pressão num ponto da conduta, por variação em passos sucessivos da sua pressão, até que o registo de uma caixa VAV esteja completamente aberto. Nesta situação, é apenas necessário conhecer as posições de fim de curso dos registos. Este último procedimento, aparentemente simples, tem diversas dificuldades de controlo, seja pela diferença de tempos de resposta entre a actuação dos registos das caixas VAV e a variação da velocidade do ventilador, seja pelo critério de decisão sobre a variação da pressão sempre que mais do que um registo esteja totalmente aberto.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A Figura 4.3 esquematiza o funcionamento típico de uma caixa VAV em que é utilizada uma bateria de água quente para reaquecimento, caso a sala necessite de aquecimento. Em modo de arrefecimento, o registo abre progressivamente à medida que a temperatura interior se afasta do valor definido. Em modo de aquecimento, o caudal de ar é fixo, correspondendo ao caudal mínimo definido na caixa, e a temperatura de insuflação é variável. Para variar a temperatura de insuflação, é actuada uma válvula modulante que controla o caudal de água quente da bateria de reaquecimento da caixa VAV.

Alguns controladores admitem dois valores para o caudal mínimo de ar nas caixas VAV. Um é definido para períodos de desocupação dos espaços, em que o caudal insuflado poderá mesmo ser nulo; outro é fixado para os períodos em que a carga térmica a remover é baixa. Este caudal é muitas vezes assumido, por facilidade de projecto, como 30 a 50% do caudal máximo da caixa VAV. No entanto, pode ser determinado pelo maior valor entre o caudal necessário à remoção da carga térmica e o mínimo que garanta as necessidades de ar exterior [4.3].

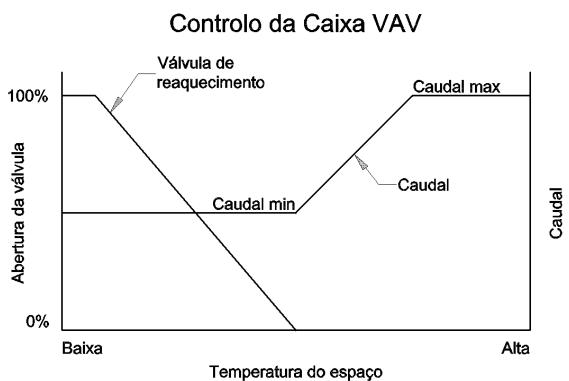


Figura 4.3. Controlo da caixa VAV

As caixas VAV podem ser divididas em função do controlo, nas que permitem a leitura directa do caudal, ou a estimativa da posição do registo, e nas que indicam apenas as posições limites de registo aberto ou fechado. A escolha entre umas e outras depende do tipo de instalação, exigências de conforto e custos associados.

Um sistema onde seja conhecida a posição de cada registo permite ajustar os diversos parâmetros de modo mais correcto. Existindo diversos parâmetros a ajustar, que interfiram entre si, poderão ocorrer instabilidades em alguns sistemas. Estas instabilidades podem ser minoradas se cada controlador local de temperatura tiver disponível uma gama limitada de variação e se a actuação nos registos das caixas VAV for lenta [4.4].

Dado que a UTA do sistema VAV insufla ar arrefecido ou aquecido, poderão existir zonas com necessidades térmicas opostas. Uma zona oposta funcionará tanto melhor em termos de conforto térmico, quanto menor for o caudal de ar de insuflação, o que por si limita a quantidade de ar novo introduzida. A resolução do problema de conforto passa pelo reaquecimento terminal nas caixas VAV, por utilização de uma bateria eléctrica ou de água quente.

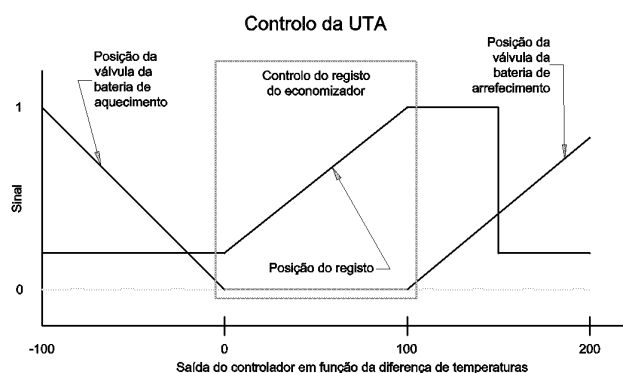
Os sistemas VAV permitem ainda, em modo de arrefecimento, o arrefecimento gratuito dos espaços, pela introdução de elevados caudais de ar exterior até ao limite do caudal total de insuflação. Esta opção é escolhida quando a temperatura, ou entalpia, do ar exterior for inferior à do ar de retorno, obrigando a actuar nos registos de retorno, admissão de ar exterior e exaustão.

Um método correntemente utilizado consiste na abertura progressiva dos registos de ar exterior e de exaustão, à medida que o registo de ar de retorno fecha. Em alternativa, pode manter-se o registo de ar de exterior sempre aberto, enquanto se modula em sentido contrário apenas os registos de retorno e de exaustão.

Esta hipótese tem a vantagem de reduzir a perda de carga num dos registos.

Finalmente, há ainda a possibilidade de actuar apenas no registo de retorno, permitindo a abertura permanente dos outros dois. Em qualquer dos casos, a fracção de ar novo pode ser sempre determinada pela posição dos registos [4.5]. No entanto, esta última possibilidade deve ser estudada de modo a garantir que os fluxos de ar novo e de retorno são correctos nas diversas posições do registo.

A figura seguinte esquematiza o funcionamento de uma UTA com registo de ar exterior



acoplado aos outros dois, com válvulas de controlo da bateria de aquecimento e de controlo da bateria de arrefecimento. O controlador da UTA utiliza uma escala com valores proporcionais à diferença entre a temperatura (ou entalpia) exterior e interior. Uma medida média das condições interiores pode ser dada pela medição das condições na conduta de retorno.

Figura 4.4. Controlo da UTA

Para valores baixos do sinal é definido um caudal mínimo de ar exterior. Este caudal é aumentado quando o valor do sinal varia de 0 a 100%, permitindo aproveitar o arrefecimento gratuito. Acima de um determinado valor de temperatura é definido novamente o caudal mínimo de ar exterior. As válvulas de aquecimento e de arrefecimento são moduladas entre valores do sinal referido.

É comum o sistema de controlo actuar de modo progressivo nos registos, com base nos valores de temperatura exterior e de retorno. Esta solução apenas facilita o controlo, já que a poupança de energia ocorre logo que a temperatura, ou entalpia, do ar exterior for inferior à do ar interior. Assim, em alternativa a um sistema com modulação de registos,

poderia ser utilizado, em qualquer das soluções descritas, um sistema em que o estado dos registos, para aproveitamento do arrefecimento gratuito, fosse aberto ou fechado.

O sistema VAV tornou-se suficientemente popular nos EUA, para passar a ser considerado como o sistema de climatização por excelência. Falar de climatização ou de um sistema VAV são praticamente sinónimos nesse país.

Assim, mesmo com os sistemas de expansão directa, em que o caudal da UTA deve ser constante, os norte-americanos utilizam um registo motorizado que interliga a conduta de insuflação à de retorno, para permitir variar o caudal na insuflação.

4.4.2 Sistema VAV e caudal de ar exterior

O caudal de ar de insuflação da UTA é também designado por caudal de ar primário (q_p). Este caudal é uma mistura do caudal de retorno à unidade e do caudal de ar exterior, ou caudal de ar novo. Sendo o caudal de ar de insuflação determinado pela carga térmica de cada espaço, o caudal de ar exterior introduzido nos espaços será dependente da carga a remover.

Analise-se então o caudal de ar exterior que garante as necessidades de ar exterior em cada espaço. O caudal de ar, q_{0r} , necessário à remoção dos bioefluentes das pessoas e à remoção dos poluentes libertados pelo edifício, é calculado, de acordo com o exposto no capítulo anterior, com: $q_{0r} = R_P \cdot P + R_A \cdot A_p$. Considere-se que este caudal é inutilizado como ar novo, após passar pelas zonas servidas. Ou seja, pode ser encarado como uma subtração, que é representada a traço-ponto na figura seguinte.

Usando este mesmo conceito de ar inutilizado, considere-se que existe uma fracção de ar exterior, Z , no caudal de ar primário e uma fracção, r , no ar de retorno. Despreze-se as variações de densidade dos diversos caudais de ar com a variação das condições psicrométricas, assim como a existência de infiltrações ou extracções locais. Então, o caudal de ar introduzido nas zonas servidas, q_p , é igual ao do retorno à UTA, e o caudal de ar de exaustão, q_{ex} , igual ao do ar exterior total, q_{0t} .

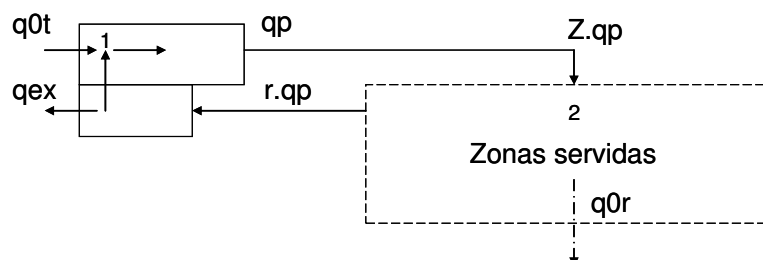


Figura 4.5. Caudais de ar num sistema com retorno à unidade

Na maioria das situações, o caudal de ar de retorno à UTA é inferior ao insuflado, quer porque se pretende que o edifício apresente uma ligeira sobrepressão, quer porque existem normalmente sistemas de exaustão localizados.

Fazendo o balanço aos caudais de ar exterior nos pontos 1 e 2, obtém-se respectivamente as equações:

$$\begin{cases} r \cdot (q_p - q_{0t}) + q_{0t} = Z \cdot q_p \\ Z \cdot q_p - q_{0r} = r \cdot q_p \end{cases} \quad (4.1)$$

De onde resulta: $r = \frac{q_{0t} - q_{0r}}{q_{0t}}$. Introduzindo o conceito de eficiência de ventilação dado pela relação entre o caudal de remoção dos contaminantes, q_{0r} , e o caudal de ar exterior total necessário, q_{0t} : $Ev = \frac{q_{0r}}{q_{0t}}$, usando a relação entre o caudal de ar q_{0r} e o caudal de ar

primário, $X = \frac{q_{0r}}{q_p}$ e substituindo r na equação de balanço do ponto 1, obtém-se:

$$Z = (1 - Ev) + X \quad (4.2)$$

Assim, fixando-se o caudal de ar exterior total, q_{0t} , sabendo-se o caudal de ar necessário à remoção de poluentes, q_{0r} , e o caudal de ar primário para a remoção da carga interna, q_p , obtém-se X e Ev , necessários à quantificação da fracção de ar exterior, Z , no caudal de ar primário. Esta determinação permite conhecer o caudal de ar exterior introduzido em cada zona, q_{0z} .

Se a abordagem for realizada em condições de projecto, o caudal q_{0z} é determinado pela equação 3.24 do capítulo anterior e o caudal de ar primário em cada zona, q_{pz} , será determinado pelas cargas térmicas de projecto, pelo que pode calcular-se uma fracção de ar novo necessária a cada zona, Z_z . Então, determina-se a eficiência da ventilação necessária a esta zona, $Ev_z = 1 + X - Z_z$. Tomando o mínimo das eficiências das diversas zonas, obtém-se a eficiência necessária ao sistema, $Ev = \min(Ev_z)$, que estabelece o caudal de ar exterior total

$$q_{0t} = \frac{q_{0r}}{Ev}.$$

Do exposto, resulta que, conhecidas as condições de funcionamento do sistema, com o caudal de ar exterior, q_{0t} , fixo, determina-se o caudal de ar novo introduzido em cada espaço; em condições de projecto determina-se o caudal de ar novo de cada zona, q_{0z} , e com a eficiência mínima de ventilação determina-se o caudal de ar exterior total. Esta determinação depende das cargas térmicas nas condições de projecto, não sendo garantia que os caudais de ar novo sejam sempre correctos a cargas parciais.

Por esta razão, a ASHRAE 62.1 permite que os caudais de ar exterior não sejam garantidos em permanência, desde que em média garantam os valores q_{0z} de cada zona.

Esta média é realizada no tempo, t , calculado como o necessário para remover por três vezes o volume, V , de ar da sala: $t[h] = 3 \cdot \frac{V[m^3]}{q_{0r}[m^3/h]}$.

4.4.3 Discussão do sistema VAV

Do exposto, depreende-se que num projecto VAV o caudal mínimo de ar novo em cada zona ocupada está intrinsecamente ligado ao caudal de ar de arrefecimento ou de aquecimento. Quando não existe reaquecimento, o caudal de ar primário mínimo, frio, pode ocasionar sobre-arrefecimento de alguns espaços, tornando-os desconfortáveis. Em alternativa, reduzir o ar primário, de modo a evitar situações de sobre-arrefecimento, pode não possibilitar a entrega do ar novo suficiente para garantir as condições mínimas de qualidade do ar [4.6].

Assim, a qualidade do ar só é assegurada nas condições de projecto ou quando as relações entre cargas térmicas estiverem de acordo com as relações de necessidades de ar novo.

As diversas dificuldades de projecto e de controlo dos sistemas VAV têm motivado fortemente técnicos e investigadores para a realização de mais e melhores sistemas de previsão e de controlo. O controlo de um sistema VAV necessita de um programa adaptado ao funcionamento do sistema, mas sobretudo de leituras correctas dos valores a medir [4.7]. Muitos problemas de funcionamento ocorrem por existir uma só medição incorrecta, ou fora dos limites impostos. Esta falha influencia directa ou indirectamente todo o ciclo de controlo. Assim, é necessário que o controlo tenha validação dos dados medidos de forma a ser imune a falhas de medição.

Existem diversas propostas que visam garantir o funcionamento dos sistemas e controlar o consumo de energia. O difícil balanço entre o ar novo a introduzir e o reaquecimento pode ser solucionado através da minimização permanente dos incrementos de consumo de energia, necessários para o sistema passar para um novo estado de funcionamento [4.8]. Outro controlador proposto combina dados das zonas e do estado do sistema, acomodando os valores desconhecidos das cargas térmicas internas [4.9]. Outro ainda utiliza módulos para estimativa das cargas térmicas e das condições exteriores, considera a temperatura de cada zona e as condições de temperatura e entalpia de retorno, mede a concentração de CO_2 e determina os modos de aquecimento, de arrefecimento e de funcionamento do ventilador. Utilizando algoritmos genéticos, com entradas das preferências dos ocupantes de cada sala, o método permite ajustar os diversos parâmetros do sistema [4.10]. Existem propostas para variar o caudal de ventilação, alterando a temperatura quando existem zonas

de funcionamento crítico. Estas zonas dependem das condições exteriores e do conhecimento da ocupação do espaço [4.11]. Conhecendo-se muito bem o funcionamento de um determinado sistema, um programa de controlo que utilize algoritmos genéticos pode permitir desacoplar os diversos ciclos de controlo dos sistemas VAV. Necessita-se para isso, de obter as relações entre os diversos parâmetros de controlo e, assim, reduzir ou eliminar as influências cruzadas entre os diversos parâmetros [4.12]. Finalmente, um outro sistema propõe uma rede neuronal, que permite a aprendizagem das condições de conforto com base no índice PMV e otimiza as condições de funcionamento do sistema VAV [4.13].

A solução conjunta do problema da qualidade do ar e do conforto num sistema VAV é difícil, mas pode tentar-se obter soluções que funcionem na maioria das situações. Em resumo, estas soluções passam por determinar a percentagem de ar exterior correcta, por aumentar a temperatura de insuflação da UTA para valores próximos da temperatura de conforto e por reaquecer o ar frio nas unidades terminais. A primeira orientação implica movimentar maiores volumes de ar e introduzir um maior volume de ar exterior. Em alguns casos, será necessário usar um VAV com 100% de ar novo de modo a garantir a qualidade do ar. A segunda implica usar um maior volume de ar insuflado. A terceira resolve o problema do conforto, mas usa ciclos opostos de arrefecimento e de aquecimento.

4.4.4 Mapeamento do projecto de um sistema VAV

A descrição do sistema VAV exposta nas secções anteriores permite suportar a decomposição das funções e dos parâmetros de projecto, definidos no final do capítulo 3. Nesse capítulo, obteve-se o mapeamento de projecto comum aos diversos sistemas de climatização, com base nas funções relativas ao conforto térmico e à qualidade do ar, até ao nível dois de decomposição. Os parâmetros PP 2.1 a PP 2.4 podem agora ser decompostos, conforme indicado na Figura 4.6, para um sistema VAV com reaquecimento.

O sistema de controlo de temperatura assegura os caudais de ar arrefecido a cada caixa VAV, sendo este caudal definido na UTA com a temperatura ajustada na bateria respectiva. Em modo de aquecimento, a bateria da caixa VAV entrará em funcionamento.

Os difusores das caixas VAV permitirão a difusão do ar no espaço, garantindo a velocidade residual apropriada.

As condições de salubridade serão obtidas pelo efeito conjunto de filtração e de admissão de ar exterior na UTA. O ar exterior necessário à instalação é depois distribuído pelos diversos espaços nas caixas VAV. A filtração do ar de cada espaço depende apenas da secção respectiva da UTA.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

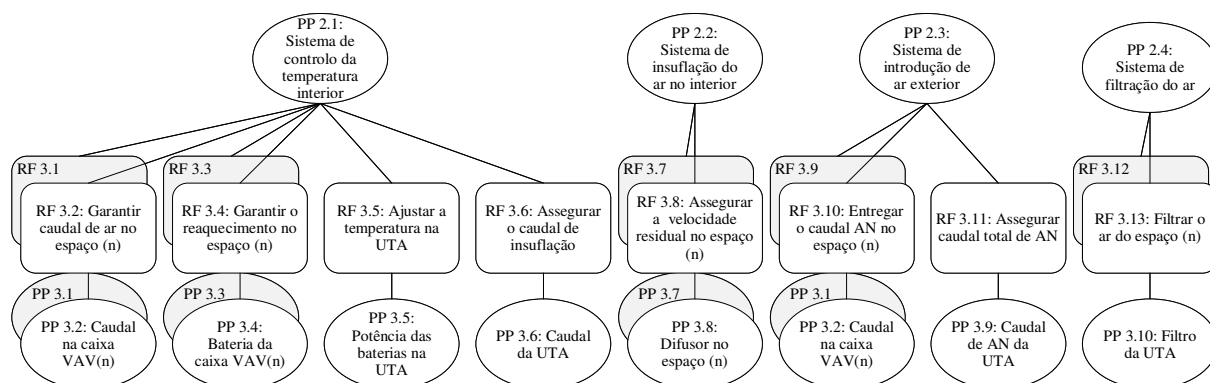


Figura 4.6. Mapeamento do projecto do sistema VAV a partir do nível 2

4.5 Sistemas com Ar Novo Dedicado⁷

Outros sistemas utilizam uma UTA que é destinada apenas ao tratamento do ar novo, designada então por UTAN. Evita-se assim alguns dos problemas referidos, tornando independente a remoção da carga térmica do ar novo necessário a insuflar. Cada UTAN tem normalmente pré-filtros de uma classe G e filtros de classe F, preferencialmente em conformidade com o exposto no capítulo anterior. A unidade tem ainda baterias de arrefecimento e de aquecimento e secção de ventilação. Poderá ainda haver uma secção de humidificação e secções de recuperação.

É comum definir-se em projecto o tratamento do ar novo para as condições psicrométricas próximas das condições interiores, não introduzindo assim carga térmica sensível ou latente nos espaços a climatizar. Esta decisão inviabiliza o aproveitamento do arrefecimento gratuito associado ao ar novo. Permite, no entanto, a independência entre a remoção da carga térmica e o fornecimento do ar novo necessário. Em climas em que é necessário controlar a humidade, os sistemas de caudal constante realizam melhor esta tarefa do que os sistemas VAV [4.14].

Muitas vezes, tenta controlar-se as condições psicrométricas de insuflação do ar novo apenas controlando a temperatura. Neste caso, o ar novo é introduzido a condições estabelecidas de temperatura, podendo a humidade relativa variar em função das condições exteriores e da carga da bateria. Nas condições de Verão, esta solução é normalmente satisfatória, mas, nas de Inverno, é aconselhável existir humidificação, malgrado poucas instalações o utilizem.

Como o ar novo é tratado para condições próximas das interiores, pode ser insuflado em qualquer ponto das salas, sendo, no entanto, comum interligá-lo à admissão dos

⁷ DOAS- Dedicated Outdoor Air System, na literatura anglo-saxónica.

ventiloconvectores. O ar de exaustão é enviado para o exterior por uma rede própria de condutas.

O caudal mínimo de ventilação de cada sala, ou zona, é facilmente calculado pela aplicação da equação 3.24, ou outra equivalente, sendo o caudal mínimo de ar novo do sistema calculado pelo somatório dos de cada espaço. Assim, este é inferior ao caudal de ventilação de um sistema VAV.

Em fase de obra, há a necessidade de calibrar a rede, de modo a garantir que os caudais de ar entregues sejam os desejados em cada sala. Este processo de calibração pode socorrer-se do cálculo da posição de cada registo, a partir do momento em que sejam conhecidas as características da rede e dos seus elementos, ou por regulação percentual de troços a realizar de jusante para montante, ou ainda, em pequenas instalações, por acertos sucessivos nos registos. Este ajuste é fixado na fase final da obra, permanecendo fixo para as condições definidas em projecto.

Em alternativa, o caudal de ventilação pode ser ajustado em cada momento às necessidades dos espaços, por actuação em registos motorizados. O processo de controlo da UTAN é análogo ao controlo descrito para o sistema VAV.

O controlo dos registos pode ser horário, por sistemas de identificação electrónica de pessoal ou em função de um parâmetro medido em cada espaço, normalmente a concentração de CO₂. Esta é geralmente usada para controlo das posições dos registos, por não interferir com a liberdade de cada pessoa e por ser adaptável às cargas de poluição existentes. Note-se, no entanto, que esta medida é sobretudo dependente da ocupação humana.

O controlo da ventilação em cada espaço necessita da informação de duas sondas, uma relativa à concentração interior e outra relativa à concentração exterior. Como as sondas de CO₂ apresentam facilmente erros de medição próximos de 100 ppm, o erro máximo no caudal de ventilação, decorrente da medição em duas sondas, será de cerca de 2 l/(s·ps), ou seja, tipicamente 20% da taxa de ventilação dos espaços. Em edifícios com ocupação muito variável, alguns espaços estarão várias vezes desocupados, pelo que pode definir-se uma posição mínima para os registos de ar novo de cada espaço, de modo a garantir-lhes uma ventilação mínima. Neste caso, a abertura dos registos faz-se a partir de uma concentração estabelecida para o ambiente interior. Podem ainda existir níveis de alarme dessa concentração [4.15].

Na situação anteriormente referida, o caudal de ar novo é tratado na UTAN e insuflado no ambiente. Numa variante desta topologia, o caudal de exaustão, na totalidade ou em parte, passa num recuperador onde troca calor com o ar novo tomado no exterior. Dependendo da qualidade do ar de exaustão, o recuperador de calor poderá ser de fluxos totalmente separados ou de roda térmica. Uma roda térmica é um equipamento instalado

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

transversalmente ao fluxo de exaustão, com o qual troca calor, e que, num movimento lento e circular, desloca os segmentos em contacto com este fluxo de modo a colocá-los no fluxo do ar novo. As rodas térmicas de favos metálicos permitem trocar apenas calor sensível entre os dois fluxos de ar; outras de material excicante, normalmente de sílica gel, permitem a troca de calor sensível e latente. Alguns problemas de qualidade do ar podem advir de uma deficiente limpeza destas rodas, ou do cruzamento entre os fluxos de insuflação e de exaustão através das frestas entre a roda e o chassis que a interliga às condutas. Este problema pode ser minorado se o fluxo de ar novo estiver em sobrepressão (50 Pa) relativamente ao fluxo de exaustão.

Note-se que os equipamentos de recuperação de energia impõem perdas de pressão nos circuitos de ar, pelo que deve ser analisado o balanço de energia entre os ganhos e as perdas destes sistemas. A EN 308 limita as perdas de carga na recuperação a 250 Pa.

4.5.1 Discussão de sistemas com ar novo dedicado

Os sistemas com ar novo dedicado utilizam as UTANs para tratar e enviar o ar novo necessário a cada espaço. Estes sistemas separam o tratamento da carga térmica do ar novo das cargas térmicas dos espaços a climatizar. Alguns artigos indicam ainda a vantagem de remoção da totalidade da carga latente na UTAN, de modo a não haver condensados no interior do edifício. Esta remoção pode ser realizada numa secção excicante, ou associada à evolução de arrefecimento na bateria respectiva. Neste caso, esta bateria pode remover toda a carga latente do sistema e a sensível do ar novo. Em termos médios nos períodos de arrefecimento no nosso clima, a carga latente do ar novo a remover não é geralmente elevada.

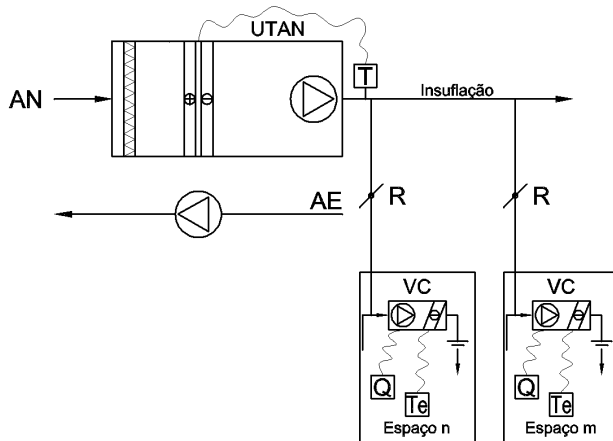
Se não existirem recuperadores, estes sistemas têm ainda a vantagem de tornarem independentes os traçados das condutas de insuflação e de exaustão.

Finalmente, é de mencionar que os sistemas típicos com ar novo dedicado não permitem utilizar o arrefecimento gratuito.

A escolha entre sistemas VAV ou com ar novo dedicado dependerá sobretudo da variação das cargas e da sua relação com o ar novo. Se existir uma relação directa entre o ar novo e a carga térmica, os sistemas VAV serão a resposta adequada.

4.6 Sistemas com Ventiloconvectores

Um sistema com ventiloconvectores utiliza ar novo dedicado e é constituído por UTANs e unidades terminais localizadas nos espaços. As UTANs insuflam o ar novo necessário nos diversos espaços e as unidades terminais, designadas por ventiloconvectores (VC), removem a carga térmica desses espaços. Uma representação simplificada do sistema é apresentada na Figura 4.7. Sem perda de generalidade, considera-se que as unidades terminais funcionam numa rede a água, a dois ou quatro tubos.



O ar novo é insuflado na rede de condutas (Insuflação), sendo a entrega em cada espaço calibrada através da actuação nos registos R. Esta calibração é normalmente efectuada no arranque da instalação. Em algumas situações estes registos são motorizados e o caudal de ar novo adapta-se às necessidades interiores.

Figura 4.7. Sistema com VC

A temperatura de insuflação do ar novo é controlada na UTAN, com base num sensor em T. Em cada espaço a carga é removida na bateria dos VC, sendo a temperatura dos espaços definida num controlador Te. Normalmente, permite-se a alteração do caudal do VC no controlador Q.

4.6.1 Unidades terminais

Os ventiloconvectores (VC) são genericamente constituídos por uma bateria de arrefecimento, por outra de aquecimento nos modelos a quatro tubos, por um ventilador e por um filtro plano de uma classe G. Em algumas instalações, existe uma pequena rede de condutas a jusante dos VCs.

Estas unidades terminais deverão remover a carga interna dos espaços, dado que a UTAN deverá introduzir o ar às condições psicrométricas médias do interior. As cargas internas são predominantemente sensíveis, na maioria dos edifícios de serviços onde estes equipamentos são instalados. É comum o factor de calor sensível (FCS) da linha da sala ser superior a 0,9 nas condições de projecto de Verão. É função do VC remover as cargas sensíveis e latentes, de acordo com a relação do FCS. Cumprir esta função implica remover

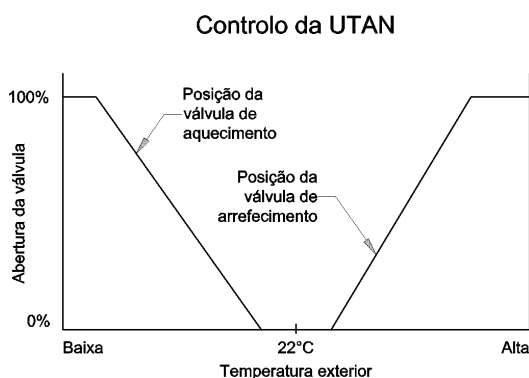
Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

a carga da sala assim como alguma carga sensível e latente introduzida pelo ar novo. Esta carga latente do ar novo é apenas resultante da gama admissível de variação dos parâmetros de controlo da UTAN, ou devido às variações de humidade que ocorram num sistema com controlo termostático.

O ajuste do FCS da bateria depende do ajuste da sua temperatura média. O aumento do FCS pode ser obtido por aumento da velocidade de passagem do ar na bateria, por aumento da área de permuta ou por aumento da temperatura média da água no circuito da bateria. Em qualquer caso, a temperatura média da bateria aumenta e, concomitantemente, o FCS no estado de funcionamento.

As baterias de arrefecimento são normalmente escolhidas para uma temperatura de entrada de água (T_e) de 7 °C e de saída (T_s) de 12 °C (regime de 7 °C-12 °C). Aumentando a diferença entre T_s e T_e , mantendo-se T_e , ou aumentando T_e e mantendo-se a diferença referida, a potência da bateria baixa e aumenta o FCS. Em regimes de (7 °C-17 °C), ou de (12 °C-17 °C), a maioria das baterias comercialmente existentes apresentam um FCS unitário, ou seja, a bateria remove apenas calor sensível.

Nas situações de Inverno, cada VC introduz a carga térmica necessária, sendo a



humidade ambiente definida pelas condições de insuflação da UTAN. O controlo das válvulas da UTAN é realizado de acordo com a figura junta, abrindo-se progressivamente a válvula de arrefecimento ou de aquecimento, à medida que a temperatura exterior se afasta da temperatura interior de conforto.

Figura 4.8. Controlo de temperatura da UTAN

Dado que a gama de aceitação da humidade relativa no ambiente é bastante ampla, conforme foi referido no capítulo 3, os problemas de controlo de humidade não são críticos na generalidade das instalações de âmbito terciário. Neste sentido, admitir que a humidade relativa possa atingir valores de 60-70% pode ser uma medida de redução dos consumos de energia.

Normalmente, o controlo da carga da bateria depende da diferença entre a temperatura medida na sala e a que lhe é pré-definida no termóstato. Em função desta diferença, é actuada uma válvula que permite aumentar ou diminuir o caudal de água na bateria. Outros sistemas menos comuns podem pesar os efeitos da humidade relativa. Sendo a temperatura efectiva TE^* a medida normalmente aceite para definir as condições de conforto, foi proposto um modelo que utiliza 24,5 °C para a TE^* no intervalo de humidade relativa entre 30 e 60%. Este modelo utiliza um controlador de lógica vaga, que permite controlar o VC de

modo a garantir condições interiores segundo a linha psicrométrica da temperatura efectiva indicada [4.16].

Em alternativa, podem ser utilizadas soluções de variação do caudal de ar de insuflação do VC, ou ainda, por actuação num registo que varia o caudal de retorno [4.17].

Nas aplicações com maior conforto, o sistema com VCs é a quatro tubos, o que permite que algumas unidades estejam a arrefecer enquanto outras se encontrem em modo de aquecimento. Nestas situações, que ocorrem na “meia-estação”, é comum utilizar-se uma banda morta de funcionamento do controlo de temperatura de insuflação do ar da UTAN, numa gama de, por exemplo, 20 °C a 24 °C. Quando o ar exterior está abaixo de 20 °C, este é aquecido, e se se encontrar acima de 24 °C, é arrefecido. Esta opção permite enviar o ar para o ambiente em condições aceitáveis para qualquer dos modos de arrefecimento ou de aquecimento, permitindo tirar algum partido do efeito de arrefecimento gratuito.

4.6.2 Mapeamento do projecto de um sistema com ventiloconvectores

O mapeamento do projecto de um sistema com ventiloconvectores é apresentado na Figura 4.9. O sistema de controlo de temperatura (PP 2.1) é assegurado pelo controlo de capacidade das baterias do VC, para um caudal de insuflação determinado. Este controlo pressupõe o ajuste da temperatura de insuflação na UTAN. O sistema de difusão assegura a velocidade residual recebendo em princípio o ar vindo dos VCs.

A filtração é assegurada prioritariamente na UTAN, havendo ainda uma filtração local nos VCs. A calibração dos registos de cada sala assegura o caudal de ar novo para cada espaço, sendo a totalidade do caudal definida na UTAN. Na realidade, este parâmetro representa o próprio sistema de ventilação.

Nesta decomposição, assumiu-se a água como fluido de distribuição, aliás como se fará no prosseguimento deste trabalho. No entanto, até ao nível de decomposição efectuada é igualmente válida para sistemas que utilizem como fluido de transporte a água glicolada, um termofluido, ou qualquer tipo de fluido frigorígeno.

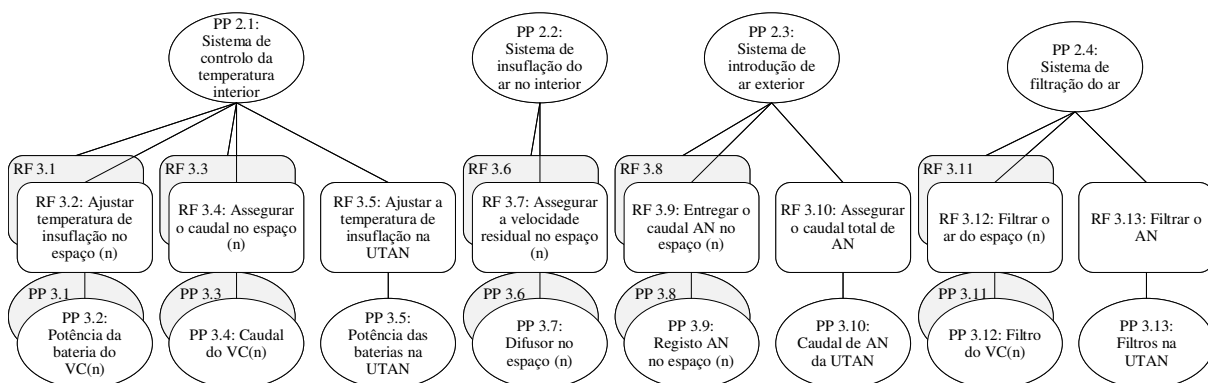


Figura 4.9. Mapeamento do projecto de um sistema com ventiloconvectores

4.7 Sistemas Emergentes

Conforme indicado anteriormente, serão ainda analisados os sistemas emergentes que utilizam ar novo dedicado, a saber tectos arrefecidos e sistemas com unidades de indução. Quer os tectos arrefecidos (TA), quer as unidades de indução (UI) removem exclusivamente carga térmica sensível dos espaços em que são instalados. Quaisquer destes tipos de unidades não filtram o ar local, devendo a filtração ser realizada apenas na UTAN. No entanto, existem alguns modelos de UI que promovem a filtração usando filtros de classe G1 ou G2 e que podem remover carga latente. Fixar-nos-emos nos modelos em que estas funções são realizadas apenas na UTAN.

Em termos funcionais, os TA ou as UI podem ser vistas como casos particulares do sistema com VC, nos quais é apenas removida carga térmica sensível e em que é excluída a função de filtração local.

4.7.1 Tectos arrefecidos

Os sistemas com tectos arrefecidos empregam uma UTAN para insuflar o ar novo necessário a cada espaço. Utilizam painéis, normalmente metálicos, justapostos a uma rede de água fria. O ambiente interior troca calor com os painéis por radiação e por convecção. Um esquema simplificado da instalação é apresentado na Figura 4.10, onde se mostram os painéis arrefecidos em cada sala e a UTAN. Esta terá possibilidade de operar em modo de

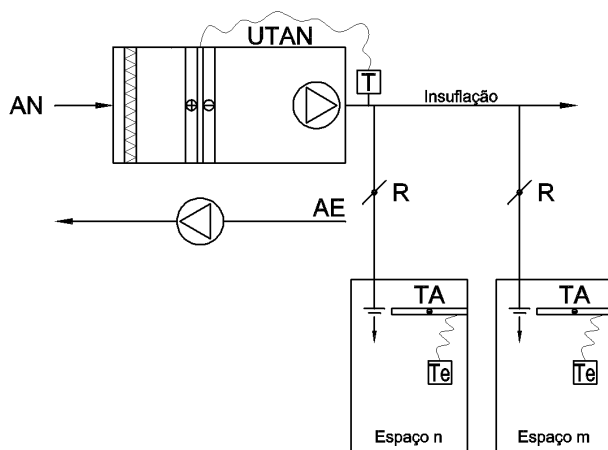


Figura 4.10. Sistema com TA

aquecimento e de arrefecimento. Outras tipologias de ar novo dedicado são ainda possíveis. A desumidificação efectuada na UTAN é obtida por arrefecimento do ar ou por adsorção ou absorção numa roda excicadora. A roda excicadora promove uma desumidificação adiabática, obrigando a um arrefecimento sensível suplementar, normalmente operado numa bateria de água fria.

De modo análogo aos sistemas com VC, o registo R é calibrado para garantir o caudal de ar necessário a cada espaço. Tal como anteriormente descrito, este registo pode adaptar-se às condições de ocupação. A carga térmica sensível é retirada nos painéis dos

tectos arrefecidos (TA), removida em função do caudal de água que passe em TA, por sua vez dependente da medição indicada no controlador Te.

Dado que não poderá haver condensação nos tectos, a temperatura dos painéis deverá ser superior à temperatura de orvalho do ambiente interior, normalmente em cerca de 2 °C. Em condições típicas de conforto de Verão, a temperatura de orvalho é próxima de 14 °C, pelo que é comum utilizar-se uma temperatura mínima da água à entrada de cada painel de 16 °C. A diferença de temperatura entre a entrada e a saída é normalmente de apenas 2 °C [4.18], obtendo-se uma temperatura radiante nos painéis próxima de 17 °C.

Com este regime de temperaturas (16 °C-18 °C), os painéis removem apenas calor sensível. Como a humidade produzida na sala tem de ser removida, a UTAN tem de realizar uma desumidificação suplementar do ar novo. Deste modo, a humidade relativa resultante em cada espaço depende do ar novo insuflado. Esta situação não acarreta problemas para o projecto de edifícios de serviços, uma vez que a humidade relativa não é geralmente um parâmetro a controlar.

Para obviar a eventuais diferenças de humidade relativa entre as salas, a variações no controlo da UTAN, ou a variações internas na carga latente de cada sala, deve definir-se uma humidade relativa interior um pouco mais baixa do que nos sistemas com VC. Pode, por exemplo, ser utilizada 40% de humidade relativa. O sistema não pode, portanto, ser sujeito a grandes variações de carga latente, o que implica, nomeadamente, a adopção de fachadas estanques e, conseqüentemente, sem janelas que abram. Trata-se, portanto, de um sistema incompatível com a adopção do conforto adaptativo, referido no capítulo anterior.

Finalmente, há que considerar que os painéis ocupam os espaços disponibilizados nos tectos, após a definição das posições de luminárias, sensores de segurança, acessos aos tectos, a condutas, às válvulas de regulação e a todo o conjunto de instalações especiais normalmente colocadas no interior dos tectos falsos. Há ainda razões geométricas que determinam o facto de não ser possível ocupar todo o espaço disponível do tecto com painéis de dimensão padrão. A ocupação de painéis no espaço total do tecto é normalmente inferior a 70%.

A potência removida pelos painéis depende das trocas de calor por radiação com as superfícies envolventes e, por convecção, com o ar ambiente. Muito embora existam trocas por radiação entre os painéis e as restantes superfícies, para efeitos de conforto térmico, estas permanecem à temperatura do ar na sala [4.18].

De acordo com o capítulo anterior, as condições de conforto térmico que garantem ao mesmo tempo condições de elevada produtividade prefiguravam um valor para PMV de -0,5. Este valor pode ser associado à temperatura seca do ar de 24 °C, para a actividade típica de

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

escritórios, velocidade residual de 0,2 m/s e humidade relativa de 50%. Num sistema de TA, o efeito dos tectos origina uma temperatura radiante média, t_{rm} , menor, que pode ser determinada pela equação 3.6. Fixando PMV, pode então determinar-se a temperatura seca. O efeito de uma menor t_{rm} permite, para valores de humidade relativa entre 40 e 50%, o incremento na temperatura seca do ar em cerca de 0,5 °C. Alguns autores indicam a possibilidade deste incremento ser de 1 a 2 °C [4.19].

Assuma-se a temperatura seca interior, t_a , de 24,5 °C, e a temperatura média dos painéis, t_{pn} , de 17 °C. A potência que absorvem por convecção, Q_c , expressa em W/(m²·C), é dada por: $Q_c = h_c \cdot (t_a - t_{pn})$. O coeficiente de convecção, h , pode ser obtido pelo número de Nusselt, $Nu = \frac{h_c \cdot L}{k_{ar}}$, sendo L a dimensão tipo do painel e k_{ar} a condutividade do ar. Em condições comuns, os painéis funcionam com convecção natural, podendo ser utilizada a expressão empírica para o cálculo de Nu médio, às condições, f , intermédias entre a sala e o painel [4.20].

$$\overline{Nu_f} = 0,15 \cdot (Gr_f \cdot Pr)^{1/3} \quad (4.3)$$

Sendo Gr o número de Grashof e Pr o número de Prandtl. A expressão é válida para o produto $Gr \cdot Pr$ no intervalo 8×10^6 a 10^{11} . Em alternativa, podem ser utilizadas expressões simplificadas [4.18], nomeadamente $Q_c = 2,42 \cdot \frac{(t_a - t_{pn})^{1,31}}{D_e^{0,08}}$, onde D_e expresso em m é a relação do quádruplo da área pelo perímetro, ou ainda:

$$Q_c = 2,13 \cdot (t_a - t_{pn})^{1,31} \quad (4.4)$$

Para painéis planos de 2x2, obtém-se com as expressões apresentadas valores de potência removida por convecção natural entre 27 e 32 W/m².

Há ainda a considerar o fluxo de calor emitido por radiação. Para uma emissividade típica de 0,9, a radiação trocada será de 39 W/m², pelo que as trocas de calor de um painel plano, Q_p , situam-se entre 65-70 W/m². Este valor é próximo do estimado por um coeficiente conjunto de convecção e de radiação de 8,29 W/(m²·°C) [4.18], mas ligeiramente inferior ao que resultaria da aplicação da expressão utilizada para determinar a carga removida por painéis arrefecidos: $Q_p = 8,92 \cdot (t_a - t_{pn})^{1,1}$ [4.21]. Esta expressão considera ainda o efeito do fluxo de ar novo insuflado junto ao tecto.

Caso este fluxo de ar seja elevado, os painéis ficam sujeitos a convecção forçada. O coeficiente de convecção em convecção forçada pode ser calculado conhecendo-se o número de Nusselt médio para uma dimensão L, característica do painel [4.20]:

$$\overline{Nu}_L = 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (4.5)$$

Sendo Re_L o número de Reynolds calculado no extremo L da placa.

Para uma velocidade típica de descarga de cerca de 3 m/s, a potência dos painéis será de cerca de 75 W/m². No caso de ser utilizada difusão do ar pelo tecto com velocidade de 3 a 5 m/s, os painéis poderão retirar cerca de 95 W/m² [4.19].

Usando o outro extremo da zona de conforto, PMV=+0,5, a temperatura seca será de 27,8 °C, obtendo-se então uma potência de cerca de 110-120 W/m² em convecção forçada.

Face à ocupação real dos painéis, em que menos de 70% do tecto é ocupado com painéis, estes valores de potência sensível são apenas compatíveis com espaços com baixas densidades de ocupação e baixas cargas externas. Na generalidade dos espaços de escritórios no clima de Portugal estas cargas são insuficientes.

Algumas soluções de projecto utilizam, para além dos efeitos considerados, a redução da temperatura do ar novo, a seguir designada impropriamente por ar novo sobre-arrefecido.

Os sistemas de tectos arrefecidos são geralmente utilizados em sistemas a dois tubos, funcionando exclusivamente em modo de arrefecimento. No entanto, podem ser utilizados em sistemas a dois ou quatro tubos. Nestas condições, existem válvulas de derivação junto aos painéis que permitem utilizar a única serpentina do painel com água fria ou quente.

Note-se que, para além de eventuais dificuldades associadas à estanquidade das válvulas, o desconforto causado por tectos aquecidos é muito maior do que o de tectos arrefecidos. Tectos a uma temperatura média de 30 °C, com o ambiente a 20 °C, causarão 19,5% de insatisfeitos com a assimetria radiante, valor que não permite associar esta condição à de qualquer das classes de conforto da ISO 7730. Já em modo de arrefecimento, o ambiente seria associado à classe A, a classe de maior conforto da ISO 7730.

4.7.2 Mapeamento do projecto de um sistema com tectos arrefecidos

A descrição realizada na secção anterior permite suportar a decomposição dos parâmetros de projecto, realizada até ao nível 2 e aplicável à generalidade dos sistemas, nas funções e parâmetros específicos dos sistemas com tectos arrefecidos. Na Figura 4.11 apresenta-se o mapeamento de projecto referido. O sistema de controlo de temperatura interior depende da potência de arrefecimento dos TA em cada sala, de modo a assegurar a

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

temperatura operativa dos espaços, existindo ainda uma UTAN que regula a temperatura de insuflação do ar exterior.

O ar exterior é entregue em cada sala, devendo o sistema de difusão do ar assegurar uma velocidade residual, por selecção dos difusores a instalar. A quantidade de ar novo a introduzir em cada espaço dependerá da posição do registo de AN em cada sala, assegurando o caudal de ar exterior especificado. A UTAN insuflará a totalidade do ar exterior, assegurando assim as necessidades de ar exterior total ao edifício.

Finalmente, o sistema de filtração é constituído apenas pela filtração de partículas do ar exterior, efectuada na secção de filtração da UTAN.

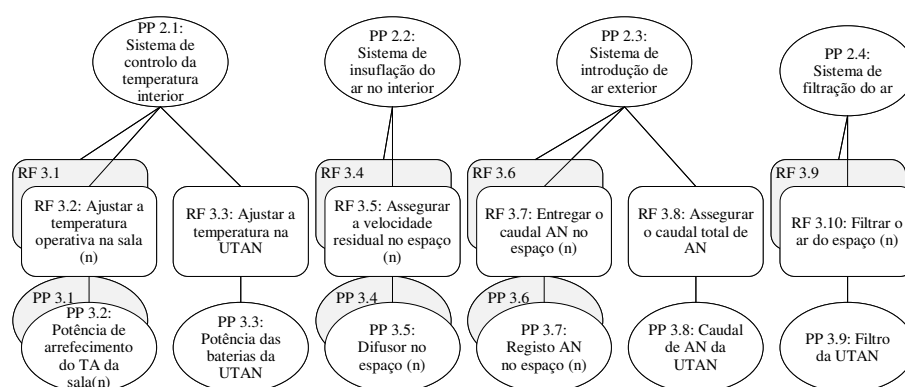


Figura 4.11. Mapeamento do projecto de um sistema com tectos arrefecidos

4.7.3 Unidades terminais de indução

Estes sistemas utilizam unidades de indução, UI, que se caracterizam por induzir a passagem de um caudal de ar numa bateria, com o caudal de insuflação de ar novo. O caudal de insuflação, designado por ar primário, é normalmente ar exterior, mas pode ser uma mistura de ar exterior com ar recirculado. O ar que é induzido a passar na bateria é designado por ar secundário e provém do ambiente interior. Sendo a potência dependente do caudal induzido e este do ar primário, o sistema de UI não permite o uso de ar primário variável. Na generalidade dos casos, o ar primário é sinónimo de ar novo.

A bateria referida é normalmente a dois tubos, podendo no entanto existir uma bateria para arrefecimento e outra para aquecimento. Em cada unidade terminal de indução, o caudal de ar primário, normalmente arrefecido, mistura-se com o secundário que foi arrefecido na bateria, sendo insuflados no ambiente interior. O ar primário é tratado numa UTA, ou mais comumente numa UTAN, onde poderá ser arrefecido, desumidificado, ou trocar calor com o ar de exaustão.

Um esquema tipo de uma instalação é representado Figura 4.12, onde se representa uma UTAN que trata o ar novo. Este ar, primário, é insuflado na rede de condutas e entregue a cada unidade, consoante as necessidades de ar novo de cada sala, ou em função das necessidades de indução de cada unidade. Um ventilador de exaustão envia directamente o ar para o exterior.

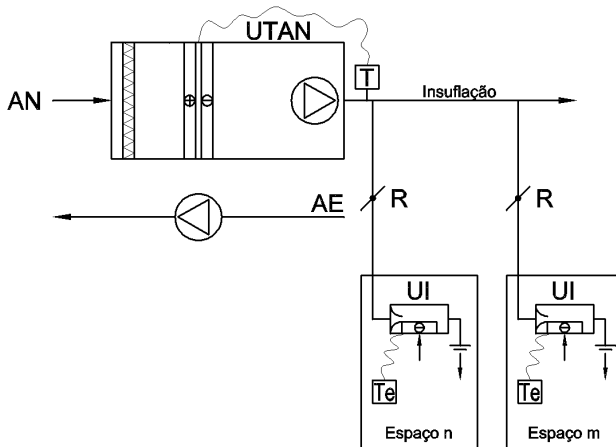


Figura 4.12. Sistema com UI

Existem vigas sem indução de ar, também designadas por vigas passivas, que têm a vantagem especial de realizar o arrefecimento sem ruído. Estas vigas arrefecem o ar da sala, que, entrando na parte superior da viga, arrefece por convecção natural e desce arrefecendo a sala. É importante que a área de passagem nos tectos para a parte superior da viga seja de cerca do dobro da área em planta da viga [4.22]. A fraca potência das vigas fez utilizar o ar novo como elemento de indução. As UI podem ser vistas como vigas arrefecidas com indução.

Normalmente, as unidades de indução, UI, não realizam desumidificação, pelo que a temperatura das suas baterias deve ser superior à temperatura de orvalho do ar ambiente. Neste sentido, é comum utilizar-se um regime de temperatura da água de 14 °C à entrada e de 17 °C à saída. Outras unidades permitem desumidificação, podendo trabalhar com o regime de temperaturas dos VC.

No primeiro caso, uma UTAN deverá realizar uma desumidificação suplementar do ar novo, necessário à remoção da carga latente dos espaços. Nesta situação, tal como acontece com os sistemas de tectos arrefecidos, o sistema é incompatível com o conforto adaptativo, devendo dar-se especial atenção à estanquidade do edifício.

Não existindo desumidificação nas unidades terminais, a humidade resultante em cada sala dependerá do caudal de ar primário utilizado. A linha psicrométrica da bateria das UI tem, portanto, FCS unitário.

O caudal de ar primário depende das necessidades de indução das unidades, determinada pela potência a remover por cada unidade. É comum uma unidade terminal necessitar de um caudal de ar primário no valor de cerca de um terço do caudal insuflado. O

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

ar primário é normalmente insuflado a 14 °C. Por exemplo, uma unidade com um caudal de ar primário de 25 l/s terá um caudal de ar insuflado de 71 l/s. Num regime de temperaturas da água de (14 °C-17 °C) esta unidade terá uma potência total de cerca de 750 W, dos quais 290 W devidos à potência introduzida pelo ar primário.

As UI são aplicável a edifícios com cargas inferiores a 80 W/m² em arrefecimento e 40 W/m² em aquecimento, em que a infiltração seja controlada e limitada [4.23].

Para as potências de arrefecimento indicadas, o caudal de ar primário corresponde geralmente a cerca de 2,7 l/(s·m²), valor muito superior ao caudal de ar novo necessário. Este caudal é insuflado a partir da UTAN, de modo a vencer as perdas de carga das condutas e a perda de carga na indução, tipicamente de 70-100 Pa.

Face aos elevados caudais de ar, estas unidades podem facilmente ser aplicadas em laboratórios, onde são usadas entre 6 a 10 renovações de ar por hora. Estas renovações de ar podem ser feitas na totalidade ou em parte de ar exterior. Se o caudal de ar primário estiver a cerca de 20 °C, encontrar-se-á em condições próximas das do interior das salas, sendo então termicamente neutro [4.24].

Dado que as UI não devem desumidificar, o ar novo deverá ser desumidificado na UTAN. Esta pode ainda ter permutadores entálpicos ou outros permutadores que troquem apenas calor sensível.

Trata-se de um sistema que funciona geralmente a dois tubos, no qual o ar primário arrefecido remove parte da carga térmica. Poderá ainda funcionar em modo de aquecimento, desde se utilize uma bateria de reaquecimento suplementar na UI.

Em modo de arrefecimento ou de aquecimento, o caudal de água na bateria da UI é controlado por uma válvula, consoante as condições interiores de temperatura. A temperatura do ar primário depende das condições gerais da instalação, sendo modulada nas baterias da UTAN.

Para além das limitações de potência, o sistema funcionará tanto melhor quanto mais uniformes forem as cargas térmicas, de modo a que o controlo da temperatura do ar primário possa efectivar-se em todos os espaços.

4.7.4 Mapeamento do projecto de um sistema com unidades de indução

A Figura 4.13 apresenta o mapeamento de projecto aplicado a um sistema com unidades de indução. Conforme referido, o sistema de controlo da temperatura interior (PP 2.1) ajusta a temperatura de insuflação na bateria da UI, que é coadjuvada pela potência do ar primário necessário para assegurar as necessidades de indução de cada unidade. A temperatura do ar primário é regulada na bateria da UTAN.

O sistema de difusão do ar interior é consubstanciado nos difusores de cada espaço, que deverão assegurar uma determinada velocidade residual de conforto.

O ar exterior necessário a toda a instalação será assegurado na UTAN, mas o ar exterior de cada espaço dependerá do caudal de ar primário, consoante as necessidades de indução do mesmo. Finalmente, a filtração do ar é executada exclusivamente sobre o fluxo do ar primário.

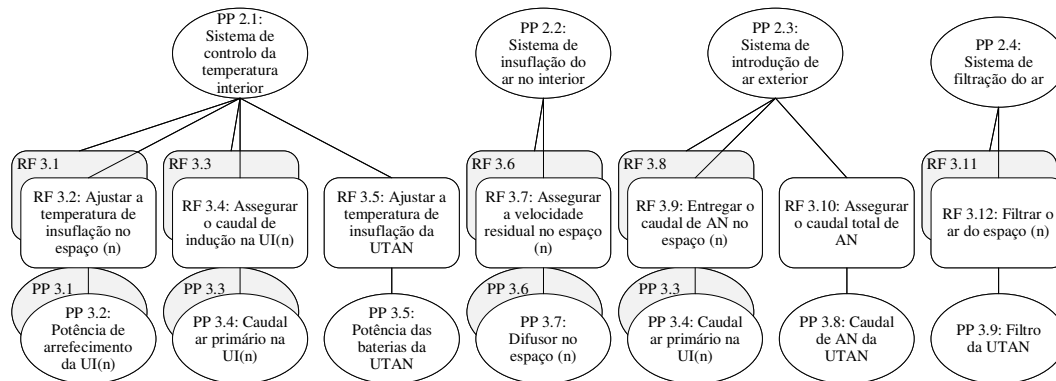


Figura 4.13. Mapeamento do projecto de um sistema com unidades de indução

4.7.5 Discussão dos sistemas emergentes

Os sistemas emergentes, tectos arrefecidos e unidades de indução têm sido associados a ambientes de grande conforto. Na realidade, na sua génese, todos estes sistemas têm velocidades residuais e níveis de ruído baixos quando comparados com sistemas convectivos. Estas vantagens advêm do facto de a remoção da carga térmica ser realizada prioritariamente por convecção natural e, nos casos dos sistemas com TA, por radiação.

No entanto, as fracas potências disponíveis em ambos os sistemas obrigaram a utilizar convecção forçada, seja pela insuflação de ar novo a velocidades de 3 a 5 m/s nos sistemas de TA, seja pela utilização de ar primário de indução nas vigas arrefecidas, o que reduz a vantagem relativa destes sistemas relativamente ao nível de ruído.

No caso dos TA, acresce que havendo uma forte componente de radiação, a resposta às variações da carga térmica interna é lenta. Esta situação pode originar desconforto em edifícios com grandes áreas de janelas, instalados em climas com elevado número de horas de radiação solar. Finalmente há a considerar, que num sistema com TA, a filtração é efectuada apenas na UTAN, pelo que deve ser usado em espaços com fraca geração de partículas. Esta consideração aplica-se igualmente a sistemas com UI sem filtros.

Os TA são equipamentos que removem apenas carga sensível, com baixa potência instalada, sendo próprios para espaços com baixa ocupação e carga térmica interna reduzida. A utilização de sobre-arrefecimento do ar novo permite aumentar a carga térmica removida. Esta opção deve ser tomada em espaços de comportamento térmico semelhante, de modo a evitar o arrefecimento excessivo de alguns espaços.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A mesma recomendação é aplicável aos sistemas com UI, onde parte da carga térmica é dependente da insuflação de ar novo. Deste modo, para garantir a remoção da carga térmica na generalidade dos espaços, os que têm baixas cargas térmicas poderão operar a temperaturas mais baixas.

Sendo o caudal de ar primário muito superior ao caudal de ar novo necessário, não é provável que surjam problemas de qualidade do ar com estes sistemas. No entanto, o consumo em energia de ventilação terá um acréscimo dependente da variação do caudal de ar novo. O sistema pode utilizar o arrefecimento gratuito, dentro dos limites em que a carga de ar novo seja favorável.

A solução para os problemas de controlo de temperatura de ambos os sistemas pode passar pela utilização de diversas UTANs, aplicadas por zonas com cargas térmicas de comportamento análogo.

4.8 Energia e Sistemas

Os sistemas VAV são geralmente conhecidos por consumirem menos energia do que os sistemas de caudal de ar constante. O investimento necessário é, no entanto, superior. As poupanças de energia advêm do facto de o caudal ser variável e da utilização de arrefecimento gratuito. Num modelo aplicado a um edifício estimou-se que um sistema com VCs gastaria entre 4,8% a 11,1% mais energia do que um sistema VAV [4.25]. Outro estudo aplicado ao VAV considerou um único registo na UTA, tendo utilizado como plataforma o programa Energy Plus. Os resultados obtidos determinaram que 71,1% dos consumos estavam no intervalo de $\pm 15\%$ dos resultados experimentais [4.26]. O Energy Plus foi usado noutro estudo para simular um sistema VRF, comparando-o com os sistemas VAV e de VC com ar novo. Concluiu que o VRF consumiria menos 22,2% do que o VAV e menos 11,7% do que os sistemas com VC [4.27].

Um estudo de um sistema VAV com 100% de ar novo utilizou a modulação de temperatura de insuflação. Aponta para a possibilidade de se obterem economias relativamente a sistemas VAV de temperatura fixa de 8 a 27%. No entanto, não sendo usado reaquecimento, existem limites mínimos para a temperatura de insuflação, de modo a evitar-se o sobre-arrefecimento em algumas zonas [4.28].

A modulação da temperatura de insuflação, ao fazer variar o caudal de insuflação, tem grande importância no consumo de energia do edifício. Estimou-se que uma diferença de 5 °C entre a temperatura de insuflação e a do ar ambiente pode originar uma potência global de projecto superior ao dobro do registado para uma diferença de 8 °C [4.29].

O problema da concentração de CO₂ em sistemas VAV foi identificado num estudo em dois edifícios de escritórios em Xangai. Verificou-se que o caudal de ar exterior varia muito de zona para zona, em especial durante períodos de carga parcial. Torna-se assim difícil

garantir concentrações de CO₂ inferiores a 1.000 ppm em todos os espaços. A partir de uma modelação numérica chegou-se à conclusão de que os sistemas VAV teriam um consumo 5,54% inferior ao de um sistema com VCs [4.30].

Noutra aplicação, concluiu-se que os sistemas com ar novo dedicado poupam energia quando comparados com um sistema VAV, devido à redução na energia de ventilação, à redução dos caudais globais de ar novo e por evitar o reaquecimento do ar. Num estudo de um espaço comercial, colocado em quatro climas diferentes, estimou-se que a utilização de sistemas de ar novo dedicado, relativamente a sistemas VAV, permitiria uma redução nos consumos de energia entre 14% e 27% e na potência do GPFC, entre 15% e 23% [4.31].

Nos sistemas de TA, a utilização de uma roda excicadora e a recuperação de calor permitem reduzir o consumo de energia [4.32]. Terão um conforto térmico superior aos sistemas convencionais, permitindo reduções no consumo de energia de cerca de 8,2% relativamente a sistemas VAV [4.21].

A simulação térmica de edifícios na Austrália permitiu concluir que a aplicação de vigas arrefecidas com indução permitiria reduzir o consumo de energia de 10 a 20% [4.33].

Finalmente há ainda a considerar a importância do ar novo no consumo de energia. Numa controvérsia sobre este assunto, um estudo em 2009 avaliou o impacto do acréscimo do ar novo sobre o consumo de energia em várias aplicações terciárias, em cinco estados do EUA. Concluiu que haveria vantagens energéticas em aumentar os caudais de ar novo em cerca de 30%, para as situações em que o caudal por pessoa se situasse entre 3 e 8 l/s [4.34].

Face ao apresentado, às diferenças de climas e às aplicações dos sistemas, será sempre erróneo indicar uma conclusão sobre os melhores sistemas em termos de consumo de energia. No entanto, pode colocar-se a hipótese de em determinados climas o consumo de energia de sistemas com ar novo dedicado ser inferior aos sistemas VAV.

Face à importância do consumo de energia na definição dos sistemas, há portanto que considerar uma nova função nos sistemas de climatização: a de Reduzir o Consumo de Energia. Esta função está estritamente relacionada com o próprio edifício, e a sua avaliação será exposta nos capítulos quinto e sexto.

4.9 Resumo e Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os sistemas de volume de ar variável (VAV) e os sistemas com ar novo dedicado. Deste tipo de sistemas apresentou-se os sistemas com ventiloconvectores (VC), com tectos arrefecidos (TA) e com unidades de indução (UI).

Os sistemas VAV funcionam com temperatura de insuflação geralmente constante, adaptando-se à carga a remover por variação do caudal de insuflação nas caixas VAV de cada espaço. Em modo de aquecimento utilizam um caudal mínimo, que será reaquecido nas baterias das caixas VAV. O caudal de ar insuflado em cada caixa é uma mistura de ar exterior, ou ar novo, com ar recirculado. Assim, a quantidade de ar novo insuflado em cada espaço depende da carga térmica de cada momento. Quando as condições exteriores são favoráveis, o VAV permite aproveitar o arrefecimento gratuito do ar novo.

Os sistemas com ar novo dedicado utilizam uma unidade de tratamento de ar novo (UTAN), para tratar e insuflar o ar novo necessário a cada espaço. Geralmente, o caudal de ar novo é fixo na UTAN, assim como em cada espaço. Estes sistemas removem a carga interna prioritariamente nas unidades terminais.

Num sistema com VC, o ar novo é insuflado nos espaços às condições médias interiores. A carga térmica interna é removida na bateria de arrefecimento ou, em modo de aquecimento, introduzida pela bateria de aquecimento. Um sistema a dois tubos terá normalmente dificuldade em garantir o conforto térmico na meia-estação.

Os sistemas com TA removem a carga interna por efeitos conjuntos de convecção e de radiação. São conhecidos como sistemas que, em modo de arrefecimento, originam ambientes de grande conforto, de baixo ruído e com baixas velocidades residuais do ar. No entanto, a carga que removem é muito baixa, o que tem obrigado à insuflação do ar novo a velocidades de 3 a 5 m/s, de modo a obter-se convecção forçada junto aos painéis. Esta opção reduz as características de conforto referidas. Estes sistemas são normalmente incapazes de funcionamento em modo de aquecimento e arrefecimento simultâneo, sendo possível a opção de modular a temperatura do ar novo de modo a introduzir alguma carga térmica nos espaços.

Nos sistemas com unidades de indução (UI) o ar proveniente da unidade de tratamento de ar é arrefecido. Este ar, designado por ar primário, é geralmente apenas ar novo, pelo que existe uma capacidade de aproveitamento de arrefecimento gratuito inerente ao sistema. Assim, a carga interna é removida em parte na bateria da unidade e em parte pelo ar novo arrefecido. O sistema poderá funcionar em aquecimento e arrefecimento simultâneo, desde que utilize uma bateria suplementar para aquecimento. Neste sistema, a carga térmica de cada espaço determina geralmente o caudal de ar novo.

4.10 Contributos, Opinião e Prosseguimento

É contributo deste capítulo a descrição dos sistemas de climatização e o seu correspondente mapeamento de projecto, a partir do segundo nível de decomposição. Este nível de decomposição tinha sido obtido no capítulo anterior, sendo comum aos diversos sistemas de climatização.

Foram escolhidos os sistemas mais comuns nos EUA e na EU: os sistemas VAV, de VC, de TA e de UI. O mapeamento de projecto foi efectuado para cada um destes sistemas até ao nível três, onde se verificaram diferenças assinaláveis entre os seus parâmetros de projecto.

Como linha de orientação, para desenvolvimento futuro, será importante discutir em que intervalos os sistemas de climatização devem satisfazer as funções para que foram projectados. Face aos investimentos efectuados nestes sistemas, não é razoável que sejam definidos sem que se garanta que cumprem permanentemente essas funções.

Coloca-se ainda a necessidade de discutir as características dos sistemas dependentemente do clima, para adaptá-los ao meio ambiente e às cargas internas. Em particular, seria interessante avaliar para os climas de Lisboa e do Porto, as necessidades de aquecimento e de arrefecimento simultâneo e o potencial de arrefecimento gratuito.

Este tipo de estudos poderia comprovar a hipótese da necessidade de sistemas a quatro tubos para o nosso clima. Na realidade, a variação da carga de radiação nas fachadas e a variação de temperatura exterior nos períodos de meia estação indiciam a necessidade de utilização de sistemas com aquecimento e arrefecimento simultâneo.

Deixa-se ainda em aberto a discussão relativa à utilização de conforto adaptativo. Num clima como o de Portugal, geralmente referido como ameno, a utilização mais corrente do conforto adaptativo permitiria reduzir o consumo de energia nos edifícios. Nomeadamente, seria interessante conhecer o desempenho energético de sistemas mistos, activos e adaptativos, sujeitos ao nosso clima, já que, em diversos períodos do ano, a abertura de janelas permitiria reduzir concomitantemente a carga de arrefecimento e o consumo em ventilação.

Finalmente, há que avaliar qual deve ser o papel de uma função associada ao ruído dos sistemas. Esta função foi deliberadamente considerada externa a este trabalho, mas é importante a sua avaliação por ser muitas vezes usada como critério de escolha entre sistemas.

Capítulo 5

Energia

“We owe our prosperity, security and way of life to the passion and dedication of past generations. Now it is our time to experience and share an unifying cause of rising to conquer the crisis that we are all faced with... there really is no other option.

It is now our time to carry the fire of the ASHRAE promise of a sustainable future”.

Terry Townsend, Presidente da ASHRAE, 2006-07

5.1 Introdução

No Capítulo 3 foram apresentadas as principais funções de um sistema de climatização. Recorrendo às normas que retratam as necessidades do utilizador do sistema, realizou-se a decomposição das referidas funções. Tal decomposição foi efectuada até um nível de detalhe, em que as funções e parâmetros de projecto são comuns à generalidade dos sistemas existentes.

Para além destas funções, o projecto de um sistema de climatização deve considerar os interesses do investidor e da sociedade. São interesses do investidor os custos de investimento, manutenção e de energia; são do interesse da sociedade o ciclo de vida dos materiais e o consumo de energia. Debruçar-nos-emos neste trabalho apenas no consumo de energia.

O consumo de energia nos edifícios, em particular nos sistemas de climatização, relaciona-se com o investidor por via dos custos associados à exploração do edifício; relaciona-se com a sociedade pelas consequências sociais da transformação da energia, quer pelos problemas ambientais provocados por essa transformação, quer pelos conflitos emergentes da escassez de reservas de combustíveis fósseis.

O problema da energia nos sistemas de climatização tem tido tal premência que, muitas vezes, as funções do utilizador são esquecidas em benefício da redução do consumo de energia. Há, pois, que incluir nos sistemas de climatização outra função do primeiro nível de decomposição: “Reduzir o consumo de energia”.

Neste capítulo abordar-se-á de modo genérico o problema da escassez de recursos energéticos, como pano de fundo à função referida. Reflectiremos em seguida sobre o consumo de energia nos edifícios, que representa nas sociedades ocidentais entre 30 a 40% do consumo de recursos de energia primária.

O modo como a energia é utilizada nos edifícios será analisado com suporte em normas, directivas e regulamentos associados. Face ao tema deste trabalho, este capítulo foca principalmente o consumo de energia em edifícios e, em particular, o consumo associado aos sistemas de climatização.

Apresentar-se-á a norma ASHRAE relativa ao consumo de energia em edifícios e a directiva europeia, sua congénere. Em seguida, apresentar-se-á com algum detalhe o resultado da transposição desta directiva para a legislação de alguns países europeus, dando-se particular atenção à legislação nacional. O sucesso dos programas de melhoria da eficiência energética, no parque de edifícios, dependerá da qualidade das medidas preconizadas em normas e directivas. Esses programas devem considerar não só os novos edifícios, mas também os existentes.

Geralmente, a adopção das medidas preconizadas impõe novas tecnologias. Existem, no entanto, diversas barreiras que interferem na introdução de tecnologias eficientes, que serão brevemente referidas.

Finalmente, há que ter consciência de que a melhoria da eficiência energética terá como consequência a redução do preço da componente de energia na prossecução de uma qualquer função. O principal objectivo deste capítulo é a análise da função de primeiro nível “Reduzir o consumo de energia em edifícios”, em especial os de serviços, focando com maior detalhe a função filha relativa a “Reduzir o consumo do sistema de AVAC”.

5.2 A Escassez de Recursos Energéticos¹

A máquina de Thomas Newcomen posta em funcionamento em 1712 nas minas de carvão de Inglaterra, pode marcar o início da revolução industrial e do consumo crescente de recursos de energia. Desde então, pode estabelecer-se uma relação entre o desenvolvimento dos países e o seu acesso a recursos energéticos: o desenvolvimento dos EUA após a segunda Grande Guerra esteve ligado à abundância de petróleo no Texas, no Oklahoma e posteriormente na Califórnia; o desenvolvimento da Grã-Bretanha na revolução industrial deveu-se à existência de jazidas de carvão; o petróleo no Mar do Norte contribuiu fortemente para o desenvolvimento recente da Grã-Bretanha e da Noruega.

Em 1949, Hubbert previu que a produção americana de petróleo atingiria o máximo entre os anos 1966 e 1972 [5.1]. A produção máxima foi atingida em 1970, pelo que, nos anos seguintes, os restantes barris necessários ao desenvolvimento dos EUA foram importados. Em 1973, os EUA já não controlavam o preço do barril de petróleo.

¹ Os dados deste subcapítulo, quando não referenciados, são essencialmente provenientes de cerca de 80 artigos do *Economist*, datados de Fevereiro de 2007 a Dezembro de 2008, de Dezembro de 2009 e de Janeiro de 2010.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Os efeitos conjugados da exploração das reservas do Mar do Norte, os interesses dos países da OPEP e a exploração intensiva dos recursos da URSS, com vista à obtenção de divisas, permitiram a estabilização de preços nas décadas de 1980 e 90. Um artigo recente² sobre o esgotamento das reservas de petróleo e gás previa para 2007 o pico de extracção de recursos energéticos mundiais. O pico de extracção de petróleo terá ocorrido em 2005; o pico de extracção de reservas da URSS ocorreu em 1987; o pico de extracção no Mar do Norte, em 2000. Qualquer destas datas tem um significado político importante.

As novas explorações do petróleo na Nigéria, na Venezuela e, mais recentemente, a descoberta de novos poços em Tupi Sul, no Brasil, trouxeram novo alento às economias ocidentais. Angola tem neste contexto um papel de relevo, com uma produção de 1,9 milhões de barris de petróleo por dia (bpd), a maior da África subsariana depois da Nigéria.

O máximo histórico do preço do barril de petróleo, próximo de 151 USD, ocorrido em Julho de 2008, indica que os preços estáveis das décadas de 80 e de 90, de cerca de 20 USD, são uma realidade do passado. No pico desta crise, a Arábia Saudita só é capaz de realizar um ligeiro aumento da produção. Os potenciais efeitos de uma baixa do preço do petróleo, provocada por este aumento de produção, são absorvidos pelos anúncios de instabilidade meteorológica no golfo do México e por um ataque a um oleoduto na Nigéria.

A Arábia Saudita já não tem capacidade de produção para controlar os preços do petróleo! Tinha-se atingido o máximo histórico. O preço máximo deflacionado ocorrido em 1980, havia sido ultrapassado!

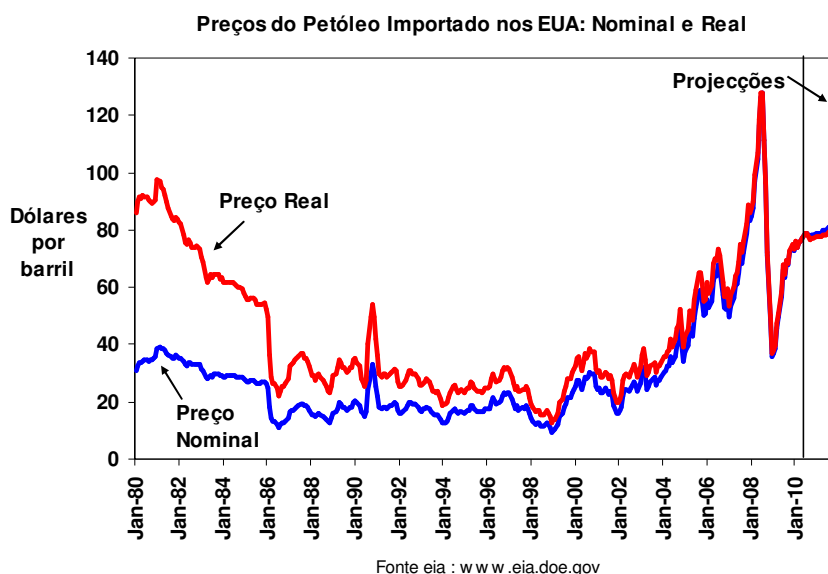


Figura 5.1. Preço do petróleo real e nominal

Apesar da alta dos preços do petróleo, as economias ocidentais não entraram logo em recessão. Os analistas indicaram que estas economias estavam menos dependentes do

² Yves Cochet, 2004, *Le Monde*, 1 de Abril.

petróleo, que o mercado de trabalho estava agilizado e que os bancos centrais sabiam gerir melhor os fenómenos de inflação. Outros argumentavam que a crise tinha sido exportada para os países onde a produção industrial é maior, em especial os da Ásia, os quais estariam a absorver os sobrecustos do aumento do petróleo.

Mesmo assim, de Maio de 2007 a Maio de 2008, o índice de preços dos 30 países da OCDE subiu 3,9%, sendo de 14,6% na energia e de 6,1% na alimentação. O preço de outros produtos subiu também, nomeadamente o do cobre, do trigo, do café, do cacau e do algodão.

As reacções foram diversas neste cenário de crise. A China e a Índia subsidiaram os preços para evitar tensões sociais. A China lançou um programa importante de exploração de carvão; a exploração das areias betuminosas do Canadá iniciou-se quando o barril de petróleo atingiu os 40 USD; a exploração de carvão na Virgínia Ocidental potenciou o desenvolvimento da região; iniciou-se a exploração do último grande poço de petróleo do Mar do Norte, o poço de Buzzard.

A crise económica ocorrida em Setembro de 2008 aliviou a pressão sobre os preços, mas o problema da escassez de recursos energéticos obviamente permanece. Em Dezembro de 2008, o preço do petróleo retornava aos 47 USD. A Arábia Saudita, ciente do seu anterior papel de regulação dos preços, que talvez já não detenha, pretendeu reduzir a produção para apoiar a estabilidade de preços. Historicamente, nem sempre a redução da produção foi sinónimo de aumento dos preços. Em cenários de crise, a perspectiva de aumento do preço do petróleo tem tido, por vezes, o efeito de aprofundar a crise e reduzir o consumo.

Entretanto, o Iraque pretende readquirir o papel que tinha antes da guerra de 2003. A paz relativa que se sente na região desde 2008, permitiu-lhe lançar concursos internacionais de exploração. A exploração da jazida de Majnoon, uma das maiores de todo o mundo, foi adjudicada no final de 2009. O aumento da produção no Iraque deverá fazer reduzir os preços a curto prazo, ou forçar outros membros da OPEP a reduzir as suas produções.

Prevê-se que o consumo mundial de barris de petróleo aumente dos actuais 84,7 milhões por dia para 105 em 2030, caso os cenários de desenvolvimento se mantenham. Este aumento será provocado sobretudo pelo consumo dos países externos à OCDE. Associando-se este acréscimo, e necessitando o mercado de aumentar a produção em valores superior em quatro vezes a produção da Arábia Saudita, parece ser difícil encontrar novas reservas neste valor. Acresce que o aumento do consumo, consentâneo com a limitação de aumento da temperatura no planeta, é possível até aos 87 milhões de barris por, pelo que esta carência terá um efeito ecológico positivo.

Entretanto, atingiu-se em algumas jazidas o limiar de rentabilidade energética de exploração. Nos EUA, a relação entre a energia gasta na extracção e a energia contida nos

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

recursos extraídos passou de 1/28 em 1916 para 1/2 em 2004. Mais que um limite económico, há um limite energético para a extracção de petróleo.

A par do problema da falta de recursos de energia, existe um problema ambiental associado ao consumo de hidrocarbonetos: o aumento progressivo da concentração de CO₂ na atmosfera; o aumento do nível médio do mar; o degelo de glaciares; o aumento da temperatura média do ar; o aumento do número de furacões e da sua intensidade... Todos estes efeitos ocorreram com mais intensidade nas últimas décadas, indiciando uma forte relação entre o consumo de combustíveis fósseis e as alterações climáticas. A Ciência, presa socialmente ao paradigma da prova, demorou mais de duas décadas a passar a mensagem da necessidade de actuação política.

O ponto alto desta controvérsia surge na conferência de Quioto (1997), em que um grande número de países, e a Europa na sua totalidade, assinaram a intenção de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa para os níveis de 1990. A globalidade dos países da UE-15 propuseram reduzir, até 2012, as suas emissões para valores inferiores em 8% aos registados em 1990. Neste quadro, Portugal poderia aumentar as suas emissões em 27%. A forte tendência de crescimento das emissões em Portugal foi tal que, em 2005, o nosso país já ultrapassava o limite indicado por Quioto, para 2012, em 12,3% [5.2]. A tendência geral dos EU-15 foi de decréscimo das emissões. Do outro lado do Atlântico, o Canadá ultrapassou em 30% os limites acordados para 2012.

A divergência em relação às metas traçadas implicará prejuízos económicos impostos pelo acordo.

Alguns economistas apoiam a ideia de criar uma taxa fixa sobre as emissões de CO₂, ao contrário das actuais licenças negociáveis para poluir³. Uma taxa impõe directamente um custo, ou seja, quando uma tecnologia mais limpa é utilizada, ocorre directamente um ganho. Com o modelo vigente de quotas permitidas, sempre que surge uma tecnologia que permite baixar as emissões de CO₂, a pressão na procura de permissões é reduzida e o seu preço tende a baixar. Na realidade, após a quebra económica em Outubro de 2008, o preço das permissões reduziu-se de 30 para 20 €/ton CO₂. A redução da actividade industrial na UE que se cifrou em 13% em 2009, associada aos maus resultados da conferência de Copenhaga, realizada em Dezembro de 2009, fizeram reduzir, de novo, o preço da tonelada de carbono. No mercado Europeu (EU-ETS⁴) passou de 14,60 € antes da conferência para apenas 12,70 € em Janeiro de 2010. Esta tendência desencoraja os investimentos em tecnologias limpas.

Nos EUA pretende aprovar-se uma taxa fixa sobre as emissões de CO₂ de 12 USD/ton a vigorar em 2012, valor que deverá subir para 20 USD/ton em 2020.

³ “Cap-and-trade”, na literatura anglo-saxónica.

⁴ EU-ETS: European Union Emissions Trading Scheme

No entanto, um valor próximo de 40 USD (cerca de 30 €) tem sido referido como o necessário para o desenvolvimento dessas tecnologias, pretendendo-se que seja provavelmente a melhor forma de reduzir as emissões de carbono.

Para além das medidas políticas com vista à redução do CO₂ atmosférico, existem diversas soluções tecnológicas a serem implementadas que poderão contribuir para esse fim. A utilização de computadores na gestão de frotas, na logística, nos edifícios, nos processos e nas videoconferências é bastante rentável em termos de emissões de carbono, numa relação de 1 para 5. As soluções de captura do CO₂ em poços de petróleo já explorados, no Dakota do Norte, na Noruega e na Nigéria, podem indiciar uma nova área de negócio, muito embora a sua capacidade de contenção seja mínima em comparação com as emissões mundiais. A Grã-Bretanha, face à depleção dos seus poços, está especialmente interessada neste negócio.

Existem soluções com algas que podem produzir cerca de 9.000 l de etanol por ano num hectare; o etanol produzido no Brasil, supostamente plantado apenas em antigas áreas de pastagens, é o mais ecológico, gerando 8,2 vezes mais energia do que aquela que é usada na sua produção; a mesma relação é de 1,5 para o etanol derivado do milho, produzido nos EUA; a produção massiva de painéis fotovoltaicos na China permitiu a redução do seu preço.

Por outro lado, a eficiência energética é assumida como uma medida de redução das emissões, mas por si só, como a seguir se verá, as poupanças resultantes desta eficiência têm mais um valor económico que ecológico. Na UE existe a intenção de aumentar de 2% para 20% a energia proveniente de fontes renováveis até 2020. Em Março de 2007, a UE aprovou o plano conhecido por “20-20-20”, que pretende, em 2020, obter conjuntamente emissões de gases de efeito de estufa inferiores em 20% aos níveis de 1990 e prover 20% das necessidades de energia através de fontes renováveis.

É, no entanto, necessário compreender que a grande maioria das novas tecnologias só são economicamente rentáveis se subsidiadas. A energia eólica instalada em terra será rentável se a taxa sobre as emissões de carbono alcançar os 28 €/ton; a da eólica marítima se atingir os 100 €/ton; e os painéis fotovoltaicos quando alcançar os 145 €/ton. Os potenciais investidores em centrais nucleares pretendem uma taxa de carbono de 50 €/ton.

Assim, o objectivo da UE de produzir 20% de energia primária por fontes renováveis é, por si só, um mau investimento. Este tipo de investimentos acaba por ter consequências económicas importantes: em Espanha, o kW·h eléctrico proveniente de fonte solar é comprado a 44 cêntimos, enquanto a produção por modo convencional custa apenas 4. Os subsídios da Espanha às energias renováveis criaram uma bolha de mercado, que, com a recente crise obrigou a eliminar 20.000 postos de trabalho na indústria associada à energia

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

solar. Outro exemplo ainda são as explorações marítimas renováveis do mar do Norte, que têm uma diferença assinalável relativamente às anteriores explorações de petróleo: enquanto estas foram rentáveis, as renováveis dependem de um sistema de subsídios! As consequências irão surgir.

Neste ambiente de incerteza, pondera-se de novo a geração de electricidade utilizando centrais nucleares. O nuclear é livre de emissões de carbono e constitui uma alternativa controlada pelas sociedades ocidentais, em termos de Engenharia e de acesso aos recursos. O nuclear já gera 15% das necessidades mundiais de electricidade, com custos inferiores aos das centrais a carvão, se a estas lhes for aplicada a taxa sobre emissões de CO₂. A Areva Francesa está a construir uma nova central nuclear, a única nova em vinte anos; a Grã-Bretanha propõe-se construir uma nova central; a central da Ignalina, na Lituânia, acabou por ser reconvertida, após alguma controvérsia, e manter-se-á em funcionamento por mais dez anos. O paradigma relativamente ao nuclear mudou!

Ainda há poucos anos, a Bulgária, para aderir à EU, teve de dar como contrapartida o fecho de dois reactores em Kosloduy. Outro facto interessante é a instalação de quatro novos reactores nucleares nos Emirados Árabes, projecto ganho pela coreana KEPCO.

No ano passado, os países de todo o mundo reuniram-se sob a égide das Nações Unidas, numa nova conferência: a conferência de Copenhaga que decorreu de 6 a 18 de Dezembro de 2009. Pretendia criar-se novas metas até 2020 ou em alternativa até 2050, mas não resultou qualquer medida concreta. Em verdade, a partir de 2012 entrar-se-á num período sem orientações. As medidas relativas ao protocolo de Quioto, que vigoram desde 2005, têm objectivos definidos apenas para o período de 2008 a 2012.

Está em causa o aquecimento global do planeta, que se supõe possa subir sem consequências especialmente graves até 2 °C acima das temperaturas registadas no período pré-industrial. Este valor não é consensual, já que os países formados por ilhas propuseram uma subida máxima de 1,5 °C.

Se se mantiver o crescimento dos países menos desenvolvidos será necessário que os mais desenvolvidos reduzam as suas emissões em 80%, em 2050, relativamente aos níveis de 1990. Prevê-se, pelo menos, a necessidade de redução destas emissões em 25 a 40%. A UE propôs manter o objectivo para 2020 de reduzir as emissões de CO₂ em 20%, relativamente aos níveis de 1990; já os EUA são menos ambiciosos, propondo apenas 4%; a China pretende baixar a intensidade energética do seu PIB em 40 a 45%, já em 2020.

Os resultados desta conferência foram poucos de decisões. No entanto, tornou-se público que é possível alcançar as elevadas reduções nas emissões, com a consequência económica de um pequeno abrandamento do PIB mundial. Lord Stern estimou que será necessário reduzi-lo em apenas 1%. Este valor necessita, no entanto, de um plano

correctamente traçado e aplicado. Mesmo que venha a ter dificuldades técnicas de aplicação, esta proposta teve pelo menos o mérito de quantificar a redução do PIB. A aceitação política foi generalizada. Além disso, um inquérito mundial verificou que a maioria dos povos do mundo aceitaria reduzir o crescimento do PIB em 1%, se este esforço permitisse alcançar os objectivos propostos de redução das emissões.

5.3 O Efeito de Retroacção⁵ no Consumo de Energia

O aumento da eficiência energética pode ser entendido como a realização de um conjunto de funções com menos energia. Ou, de outro modo, corresponde a baixar a energia incorporada num produto. Esta variação pode, assim, ser entendida como uma redução do custo da energia, o que, num mercado em equilíbrio, corresponde a aumentar o seu consumo. O efeito final de um aumento da eficiência energética é, pois, uma redução menos que proporcional do consumo de energia. Pode dizer-se que o sistema de consumo de energia é um sistema amortecido com retroacção.

A exposição que Leonard Brooks [5.3] apresentou em 2005 perante o Parlamento do Reino Unido, relativamente a este efeito, marca a colocação deste problema em termos públicos. Leonard Brooks afirma que a redução do consumo de energia tem dois grandes objectivos: a redução das emissões de gases de efeito de estufa e a redução da dependência das importações de energia. Nenhum destes objectivos macroeconómicos é consequência da eficiência energética, sustenta!

Com o aumento da eficiência energética surgem diversas formas de retroacção [5.4]: retroacção directa, ou seja, se o preço para obter uma função diminuir, será de esperar um aumento da sua utilização; retroacção indirecta, ou seja, logo que a satisfação dessa função no mercado sature, as poupanças são redireccionadas para a satisfação de novas funções; retroacção económica: se a incorporação de energia na satisfação de funções diminuir, será de esperar a substituição de outros factores económicos, nomeadamente trabalho e capital, por energia.

A substituição de factores de trabalho por energia origina geralmente um incremento da valia associada à produtividade, superior ao incremento do custo da energia consumida. Este conceito não deve ser confundido estritamente com a redução da intensidade energética do PIB de um determinado país. Actualmente, há que considerar, que para essa redução, contribui fortemente o aumento do PIB, suportado pelo marketing e pela deslocalização da produção.

⁵ “Rebound effect”, na literatura anglo-saxónica.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Diversos estudos indicam um valor inferior a 0,3 para o efeito de retroacção directa no consumo de energia. No entanto, os restantes efeitos de retroacção são superiores ao efeito directo.

Os efeitos de retroacção, ao nível de um país, tenderão a diminuir à medida que o seu produto aumente, dado que as oportunidades de melhoria a baixo custo estarão realizadas e as oportunidades restantes necessitarão de investimentos elevados [5.5].

Do conjunto dos efeitos descritos resulta o modelo e postulado de Khazzoom-Brookes, que afirma: “O aumento da eficiência energética tem tido como consequência um aumento do consumo de energia” [5.6].

Este postulado pode ser suportado com base em exemplos diversos ao longo da História. A máquina de Watt para bombagem das águas das minas tinha um rendimento de apenas 4%, mas que era à época quatro vezes superior ao da existente máquina de Newcomen. O seu aparecimento permitiu a rápida proliferação de máquinas de bombagem pelas explorações mineiras, aumentando o consumo de carvão associado. O uso comum, mas recente, de veículos de maior porte (SUV) ocorreu porque estes veículos têm consumos análogos aos dos veículos vulgares de há uns anos. Ou ainda um exemplo de comportamento social: as famílias de baixos rendimentos, com capacidade limitada de aquecimento, tendem a manter o orçamento utilizado para aquecimento, quando o sistema de aquecimento é substituído por outro mais eficiente.

A história da iluminação fornece um outro exemplo interessante. O preço por lúmen em 2000 era 3% do preço de 1800, mas o consumo em lúmen·hora *per capita* era 6641 vezes superior. Ou seja, o esforço financeiro para iluminação é hoje cerca de 200 vezes superior ao dos anos de 1800, tendo o PIB aumentado 15 vezes [5.7].

Em estudos no sector residencial nos Estados Unidos, estimou-se um efeito de retroacção médio de 0,1 a 0,3 no aquecimento e de até 0,5 no arrefecimento.

Propostas de melhoria do modelo de Brookes consideram os custos de capital, a eficiência dos sistemas e dos equipamentos, o número de equipamentos existentes, as necessidades de trabalho, o trabalho útil existente, a sua previsão e os seus custos, o preço da energia e as exigências regulamentares [5.8].

Um modelo simplificado pode ser descrito considerando apenas a energia e o trabalho. Se o factor energia puder substituir o factor trabalho, a um aumento do consumo de energia corresponderá um aumento de produtividade. Quando um factor se tornar mais rentável, o mercado tenderá a utilizá-lo de modo intensivo, mas com rentabilidades decrescentes no tempo, até igualar a rentabilidade marginal dos restantes factores de produção.

A manutenção do consumo de energia, com base na eficiência energética, só é possível se esta aumentar a taxas superiores ao dobro do aumento percentual do PIB [5.9].

O aumento da eficiência energética depende em primeiro lugar do aparecimento de novas tecnologias eficientes. No entanto, em consequência do efeito de retroacção referido,

o aparecimento de novas tecnologias eficientes contribui sobretudo para o desenvolvimento económico. São exemplos de novas tecnologias aplicadas aos edifícios a microgeração, os novos sistemas de iluminação, de refrigeração e o recurso a tecnologias de informação. Muitas destas novas tecnologias utilizam fontes renováveis de energia, havendo esperança que possam conduzir a sistemas pouco consumidores de energia. Neste sentido, regista-se uma progressiva melhoria de rentabilidade na aplicação de sistemas fotovoltaicos. Recentemente, têm surgido novos painéis com maiores eficiências e com subestruturas mais baratas.

A par das tecnologias, é importante a atitude do utilizador, que pode melhorar se este conhecer a contagem local de energia de diversos aparelhos [5.10]. É importante que a etiquetagem de aparelhos informe os consumidores das emissões associadas à sua utilização, das emissões relativas à fase da sua produção e dos procedimentos na fase de dispensa dos aparelhos [5.11].

Utilizando simplesmente a via da melhoria da eficiência energética, em condições de mercado, não é previsível que se atinja o objectivo de Quioto. Deverão ser tomadas medidas de política ambiental adicionais, que forcem o aumento directo e indirecto do custo da energia. Estas medidas poderão tomar a forma de regulamentos que, tendo força de lei, possam forjar fortes alterações no mercado. São exemplos a aplicação de taxas directas sobre a energia ou sobre as emissões de carbono; a aplicação de taxas sobre as tecnologias que produzam emissões elevadas de modo a torná-las menos rentáveis; a criação de instrumentos energéticos de aplicação voluntária em instituições ou associações de empresas; e a instituição de programas voluntários com incentivos financeiros [5.12]. Destes instrumentos, a regulação e as taxas parecem ser as que terão um sucesso mais imediato.

Estas medidas estão em linha com as preconizadas por Leonard Brooks. Pretende uma solução que actue conjuntamente em três eixos: redução ou eliminação directa do consumo de energia em determinadas aplicações imposta por via legislativa; racionalização do consumo impondo-se máximos de consumos para determinadas aplicações; taxação suplementar da energia, que reflecta os efeitos conjuntos dos prejuízos ao ambiente [5.13].

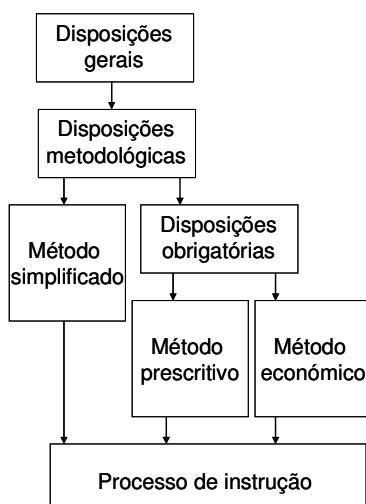
O consumo de recursos de energia nos diversos sectores de actividade deve ser entendido num quadro global. Este consumo distribui-se actualmente de forma quase equilibrada entre edifícios, transportes e indústria, assumindo o sector dos edifícios uma tendência para crescimento em termos quer absolutos, quer relativos.

A preocupação económica com o consumo de energia, a redução da disponibilidade de recursos energéticos mundiais e os problemas ambientais ditaram a criação de

regulamentos de consumo de energia em edifícios: na Europa, a directiva “Energy Performance Building Directive” (EPBD) e nos Estados Unidos, a ASHRAE 90.1.

5.4 A Norma ASHRAE 90.1

Gerou-se, na Europa e nos EUA, uma elevada preocupação com o consumo de energia nos edifícios. Nos EUA, a ASHRAE criou, em 1975, a sua primeira norma referente a esse assunto, a qual sofreu diversas reformulações nas décadas seguintes. Actualmente, encontra-se em vigor a ASHRAE 90.1⁶ [5.14], versão de 2007, relativa a edifícios não residenciais e não industriais. Esta norma utiliza uma linguagem compulsiva, muito embora não seja um regulamento. No entanto, tem sido utilizada como um regulamento, ou como base para a sua criação em diversos países. Os edifícios que cumpram esta norma podem aceder à classificação LEED⁷, programa criado pelo GBCI⁸ em 1998. Esta classificação possui quatro níveis, dos quais dependem a atribuição de pontos associados a medidas determinadas.



O objectivo da ASHRAE 90.1 é a redução do consumo de energia. Para o efeito, propõe especificações para a envolvente do edifício, para os sistemas de climatização, de água quente sanitária, de iluminação e de potência. A conformidade com a norma, no que respeita aos sistemas de AVAC, pode ser obtida por três vias: pela aplicação de princípios pré-estabelecidos para os itens, designada por método simplificado; pelo método prescritivo; ou pela avaliação económica das medidas consideradas. (Figura 5.2)

Figura 5.2. Opções de verificação de sistemas de climatização pela ASHRAE 90.1

O método simplificado aplica-se a sistemas de climatização mono-zona, quando o sistema serve espaços com áreas inferiores a 2.300 m² num edifício com o máximo de dois pisos. Neste método, inclui-se imposições para diversas características da instalação, nomeadamente no que se refere a valores mínimos para as eficiências de ciclos frigoríficos e de caldeiras. Este impõe a recuperação do calor do ar de rejeição para sistemas com caudais de ar novo superiores a cerca de 5.000 m³/h e torna obrigatória a existência de ar de retorno à UTA. Define ainda valores mínimos para isolamento em condutas e tubagens.

6 A ASHRAE 90.2 é a versão relativa a edifícios residenciais.

7 LEED- Leadership in Energy and Environmental Design.

8 GBCI- Green Building Certification Institute.

Prevê que as instalações tenham um controlo, em que os termóstatos de uma zona sejam interligados de modo a não permitirem ciclos simultâneos de arrefecimento e de aquecimento e, que, na ausência de fluxo de ar, se proceda ao fecho automático dos seus registos. O método simplificado da norma ASHRAE 90.1 define ainda que os motores de potência superior a 0,5 kW e os equipamentos de arrefecimento e aquecimento de potência superior a 4,5 kW tenham controlo de paragem quando não forem necessários. Devem ainda ser implementados algoritmos de arranque do sistema. As redes de ar e de água serão balanceadas.

Nas aplicações com sistemas de caudal de insuflação variável (VAV⁹) e com sistemas hidráulicos centralizados ou outros não englobados no método anterior aplica-se quer o método prescritivo, quer o da avaliação da rentabilidade de soluções.

Existe um conjunto de disposições obrigatórias comum a qualquer um destes métodos. O cálculo de cargas térmicas segundo a metodologia da ASHRAE é um dos requisitos obrigatórios para aplicação destes métodos. São ainda definidas eficiências mínimas de equipamentos de produção de frio e de calor em condições nominais de utilização e em condições médias sazonais. Nas disposições obrigatórias incluem-se metodologias de verificação das características dos equipamentos projectados. Inclui-se ainda regras para os sistemas de controlo. Estes devem ter sistemas termostáticos por zonas, com definição da banda morta, fecho automático dos sistemas de AVAC, controlo da ventilação, em especial em situações de elevada ocupação, e controlo dos sistemas de produção centralizados. As disposições obrigatórias definem ainda critérios de construção, nomeadamente no que se refere à estanquidade das redes e à classe de fugas das redes aeríferas.

Aplicando-se estes requisitos obrigatórios, podem ser escolhidos ou o método prescritivo, ou o económico. O método prescritivo permite a utilização de um conjunto de soluções descritas na norma. Destas soluções constam o modo de execução e de controlo de sistemas com ar de retorno às unidades de tratamento de ar (UTA) e de sistemas com recuperadores de calor nas UTAs. São adicionadas imposições relativas a perdas de carga máxima em componentes de circuitos aeríferos e potências máximas específicas (SFP¹⁰) dos ventiladores. São indicadas topologias de projecto e de controlo de sistemas hidráulicos. Refere-se, nomeadamente, os sistemas hidráulicos com recurso a caudal variável. Define-se ainda critérios para o controlo de temperatura. Nos circuitos hidráulicos existem restrições à utilização de bombas de elevada potência e às perdas de carga de sistemas de recuperação. São ainda indicadas topologias para sistemas de rejeição de calor e, finalmente, indicadas topologias de recuperação de calor em GPFCs e bombas de calor.

⁹ Acrónimo de “Variable Air Volume”, traduzido para português por “volume de ar variável”.

¹⁰ Acrónimo de “Specific Fan Power”.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Em alternativa, desde que sejam cumpridos os requisitos obrigatórios, pode ser usado o método económico. Neste caso, as soluções preconizadas em projecto são avaliadas economicamente, recorrendo-se a modelos energéticos do edifício. Nestes casos a ASHRAE 90.1 incentiva à utilização de modelos dinâmicos multi-zona. Por esta razão, a ASHRAE 90.1 inclui na versão de 2004, a título informativo, o apêndice G, relativo ao método de classificação do desempenho energético dos edifícios.

5.5 A Directiva Europeia 91 de 2002

O principal objectivo da directiva 2002/91 [5.15] (EPBD) é o aumento da eficiência energética nos edifícios, com vista à redução do consumo de energia e de modo a apoiar o cumprimento do Protocolo de Quioto. Em 2002, o sector residencial e terciário do conjunto dos então quinze países da União Europeia, absorviam mais de 40% do seu consumo final de energia, sendo que esta percentagem tem sofrido uma tendência permanente para crescer. A directiva EPBD pretende que a gestão energética de cada país melhore, com a instituição local das medidas necessárias. Estas medidas terão em consideração as condições climáticas locais, as condições de conforto e as de ventilação dos espaços interiores. A EPBD estabelece um conjunto de requisitos agrupados em cinco alíneas:

- “a) Enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios;
- b) Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios;
- c) Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos grandes edifícios existentes que sejam sujeitos a importantes obras de renovação;
- d) Certificação energética dos edifícios; e
- e) Inspecção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios e, complementarmente, avaliação da instalação de aquecimento quando as caldeiras tenham mais de 15 anos”.

Muito embora pretenda reduzir-se o consumo energético dos edifícios, os requisitos adoptados devem “ter em conta as condições gerais de clima interior, de forma a evitar possíveis impactos negativos, como uma ventilação inadequada” (artº 4º, EPBD). Refere-se ainda no preâmbulo da directiva que as medidas tomadas “deverão ter em conta as condições climáticas e locais, bem como o ambiente interior e a rentabilidade económica”.

É importante notar, que a certificação prevista pela EPBD considera o consumo de energia posterior à construção do edifício, não tendo em conta a energia incorporada nos materiais. Assim, não é difícil que um edifício alcance uma categoria energética elevada se incorporar novas tecnologias com um baixo consumo energético, mas que tenham elevado conteúdo de energia no seu fabrico. São exemplos os novos tipos de janelas, os materiais

de isolamento do edifício, a aplicação de painéis solares de aquecimento e de águas quentes sanitárias e os painéis foto-voltaicos, com pilhas associadas. Muitos dos componentes destas tecnologias serão substituídos várias vezes ao longo do período de vida do edifício. Quando aplicadas a moradias unifamiliares, o conjunto destas tecnologias pode incorporar a energia necessária a 25 anos de aquecimento da moradia [5.16].

Ou seja, o mínimo de consumo de energia primária de um edifício, pela aplicação da EPBD, não corresponde ao mínimo da energia utilizada no ciclo de vida do edifício. O funcionamento dessas tecnologias ao longo da vida do edifício pode, no entanto, permitir recuperar a energia incorporada no seu fabrico. Na secção seguinte, pretende analisar-se a transposição da EPBD para a legislação de alguns países da EU, considerando em especial o caso de novos edifícios de serviços.

5.5.1 A Transposição da Directiva em alguns países da UE

A legislação de cada um dos Estados, referente à transposição da directiva, definiu limites para o consumo específico anual de energia nos edifícios e definiu características térmicas mínimas das suas envolventes [5.17]. A legislação da maioria dos Estados-membros associa o consumo de energia à necessidade de condições de conforto térmico e de ventilação dos espaços. Um reduzido número caracteriza a iluminação, a acústica, o controlo das instalações ou a qualidade dos equipamentos.

Analisemos com maior detalhe a legislação de alguns países:

A legislação francesa [5.18] define condições de referência para cálculo do consumo de energia nos edifícios e condições mínimas a que os sistemas deverão obedecer. Define, nomeadamente, algumas condições de referência para os sistemas de climatização, considerando o EER de 2,45, a utilização de bombas de caudal constante e os sistemas de arranque e paragem por relógio. Refere áreas máximas de influência do sistema de controlo, quando aplicado a sistemas VAV, a tectos arrefecidos ou a sistemas com unidades ventiloconvectoras. Indica, como requisito, a necessidade de prever ventilação em espaços com sistemas de arrefecimento. Impõe que os sistemas de climatização tenham contagem de consumo de energia para espaços de área superior a 400 m². Em áreas superiores a 1.000 m², deve ainda efectuar-se a contagem dos consumos de iluminação. Na legislação, faz-se ainda referência à exposição dos edifícios ao ruído.

A legislação espanhola, conhecida como RITE [5.19], define um conjunto detalhado de instruções técnicas de apoio ao projecto de instalações energéticas de um edifício. Este conjunto de exigências segue as instruções das normas ISO 7730, CR 1752 e EN 13779, anteriormente referidas. Um documento de comentário com um conjunto detalhado de indicações acompanha esta legislação [5.20], agrupadas nos subcapítulos de higiene e bem-estar, eficiência energética e segurança. Nos espaços com ocupação humana, deverão

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

reunir-se condições de conforto, de qualidade do ar interior, de qualidade do ambiente acústico e dotação suficiente de AQS.

A legislação espanhola exige que haja um rendimento mínimo para os sistemas geradores de calor e que exista fraccionamento da potência dos equipamentos. Exige ainda um isolamento mínimo de tubagens e condutas e uma classificação mínima da sua estanquidade. Impõe valores máximos para a perda de carga em componentes da instalação. Os motores eléctricos terão de apresentar uma eficiência mínima e os seus consumos serão contabilizados. Exige que a velocidade de ventiladores seja controlada e as redes equilibradas. Exige ainda o controlo das condições termo-higrométricas e da qualidade do ar interior. O consumo de energia por efeito de Joule é limitado. Para sistemas de recuperação de energia, propõe formas de arrefecimento gratuito a partir do ar exterior e recuperação de calor do ar de extracção. Os recuperadores terão valores limite de perda de carga e rendimento mínimo de recuperação, para diversos patamares de caudal de ar. Pretende ainda incentivar a utilização de energias renováveis.

Finalmente, impõe exigências de segurança relativamente aos geradores de calor e de frio, à sala de máquinas, às características das chaminés e aos depósitos de combustíveis.

A transposição da directiva europeia para a legislação italiana é estabelecida por um documento de enquadramento [5.21] com diversos anexos de especificações. A aplicação é faseada ao longo dos anos 2006 a 2010. A metodologia é genérica, permitindo uma elevada liberdade no projecto, desde que cumpridos alguns requisitos de prestação energética. Estes requisitos estabelecem valores máximos de consumo de energia, limites para os valores dos coeficientes de transmissão térmica pela envolvente do edifício e rendimentos mínimos para as caldeiras. O consumo de energia previsto pela aplicação da legislação italiana é geralmente inferior ao previsto pela aplicação da legislação espanhola [5.22]. A legislação Italiana impõe a entrega de um relatório sobre o edifício com dados relativos à central térmica, à geração de energia, ao controlo da instalação e à contagem de energia. Este relatório contém a caracterização térmica da envolvente, a taxa de ventilação, o rendimento dos sistemas a carga parcial, as necessidades de energia primária nas estações de arrefecimento e de aquecimento e a descrição das fontes renováveis de energia utilizadas.

Na Grã-Bretanha existem regulamentos distintos para edifícios residenciais e não residenciais, separando claramente os edifícios existentes das novas construções. Para este estudo em concreto, interessa analisar a secção L2A [5.23] da regulamentação, relativa a edifícios novos não residenciais. Esta regulamentação impõe um valor limite para as suas emissões de CO₂ (“Target CO₂ Emission Rate”, ou TER) com base numa metodologia de cálculo. Define ainda valores limite para a condutibilidade da envolvente e para a sua permeabilidade. São definidos valores para a eficiência dos sistemas de iluminação e é considerado o controlo do sistema em função da iluminação natural disponível. Cada zona

do edifício terá um sistema de controlo para permitir a adaptação do seu sistema térmico à sua carga e do lado da produção haverá o correspondente controlo de carga em bombas de calor e caldeiras. Os aparelhos que, no seu conjunto, sejam responsáveis por 90% do consumo de um qualquer tipo de energia, terão contadores de energia. Devem existir sistemas de aquisição automática de dados nos edifícios com área útil superior a 1.000 m². As caldeiras terão valores mínimos de rendimento, quer em condições nominais, quer em termos de médias sazonais. Para bombas de calor e outras máquinas com ciclos frigoríficos, estabelecer-se-á igualmente valores mínimos de eficiência (EER) e de eficiência sazonal (ESEER). Para cada tipo de aplicação de sistemas de distribuição de ar é definido um máximo para a energia específica consumida por unidade de caudal insuflado (SFP), e para o valor de SFP a carga parcial. Os motores de ventiladores cuja potência seja superior a 1,1 kW terão variadores de velocidade. A imposição de um valor máximo de trocas de calor através da superfície de condutas e tubagens, definido por unidade de comprimento, permite determinar os necessários isolamentos.

A legislação irlandesa inclui no mesmo documento os edifícios residenciais e os não residenciais [5.24]. Analogamente à legislação da Grã-Bretanha, é definido um valor limite para as emissões anuais de CO₂ de cada edifício. Existe a preocupação de reduzir as perdas de calor pela envolvente. Para essa finalidade são definidos valores limite de condutibilidade e consideradas as perdas por pontes térmicas, bem como aquelas que são devidas à infiltração de ar. A regulamentação irlandesa inclui prescrições relativamente à iluminação artificial. Relativamente aos sistemas de climatização, são definidos valores mínimos para a eficiência de caldeiras. Aponta-se valores máximos para o SFP de ventiladores e define-se os isolamentos mínimos de condutas, tubagens e depósitos. Relativamente aos sistemas de controlo, a regulamentação irlandesa refere a necessidade de controlo horário e por temperatura.

5.5.2 A legislação nacional

Em Portugal, o crescimento médio do consumo de energia final, no período de 2000 a 2006¹¹, foi de cerca de 2,8%, no conjunto dos sectores doméstico e de serviços. Uma análise à evolução do consumo de energia final por sector, neste período, revela que o sector de serviços tem tido um aumento médio de 4,2%. No entanto, têm existido fortes variações desta taxa, que foi de 13,6% em 2001 e de -11% em 2006; o sector doméstico, sendo mais estável, tem tido igualmente taxas díspares, atingindo 3,1% em 2002 e -0,6% em 2006, contabilizando-se um aumento médio de 1,8%.

¹¹ Direcção Geral de Energia e Geologia (www.dgge.pt), 2008, Balanço Energético.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Em 2006, a percentagem de energia final incorporada nos sectores referidos foi de 29% e a percentagem de electricidade final de 62%. Resulta destes valores que a percentagem de energia primária adstrita aos sectores referidos é de 35%¹².

Em Portugal, a transposição da directiva realizou-se por um documento enquadrador designado por “Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios”, associado aos decretos-lei relativos às características térmicas dos edifícios (RCCTE) [5.25] e aos sistemas energéticos de climatização (RSECE) [5.26].

O primeiro revogou o anterior RCCTE¹³, de 1990, que impunha requisitos mínimos para a envolvente dos edifícios, como medida de redução do consumo de energia e de melhoria das condições de habitabilidade. O novo regulamento tem objectivos semelhantes ao anterior, com requisitos de resistência térmica da envolvente, duplos dos do anterior regulamento. Incorpora o consumo de energia para águas quentes sanitárias (AQS) impondo, sempre que utilizáveis, a instalação de painéis solares térmicos. É aplicável à generalidade das habitações e aos pequenos edifícios de serviços com potência de climatização inferior a 25 kW. Para que um edifício sujeito ao RCCTE seja regulamentar, é necessário que as suas necessidades de energia para aquecimento, arrefecimento do ambiente e de aquecimento de AQS sejam individualmente inferiores a valores nominais, definidos em função da localização do edifício e das suas características geométricas. Obriga ainda a que o consumo previsível total de energia seja inferior a 90% da soma das energias nominais referidas.

O RSECE tem por âmbito os grandes edifícios de serviços, genericamente definidos como aqueles que têm mais de 1.000 m² ou os que possuem sistemas de climatização de potência superior a 25 kW. É aplicável a edifícios novos ou sujeitos a grandes remodelações. Distingue a aplicação entre grandes e pequenos edifícios de serviços: os primeiros, sendo dominados pela carga interna elevada, têm como requisitos de isolamentos os valores mínimos definidos no RCCTE. Um grande edifício de serviços será regulamentar em termos de consumo de energia previsível se o seu consumo nominal for inferior a valores limite definidos para cada tipo de edifício. O consumo nominal é dado pelo indicador de eficiência energética (IEE), calculado para um edifício análogo ao real, com utilização e localização semelhantes, sujeito a valores definidos de cargas internas com perfis nominais de utilização. O IEE é expresso em toneladas equivalentes de petróleo de energia primária anual, por área útil do edifício. É obtido por simulação dinâmica do comportamento térmico do edifício, considerando a interacção entre as suas diversas zonas; os pequenos edifícios de serviços deverão cumulativamente cumprir o IEE calculado por método simplificado e

¹² Admitindo 1 kgep=10.000 kcal (não foi obtida confirmação da DGEG para o ano de 2006).

¹³ Dec. Lei 40/90 de 6 de Fevereiro.

apresentar um consumo de energia previsível pelo RCCTE inferior a 80% da soma das energias nominais.

Qualquer edifício sujeito ao RSECE tem requisitos mínimos de qualidade do ar interior (QAI), definidos em fase de projecto, fundamentalmente pelos caudais de ventilação mínimos insuflados nos espaços ocupados. Estes são calculados em função ou da ocupação humana ou da área útil servida. Em fase de projecto, deverá haver especial cuidado com as fontes de poluição internas ou externas ao edifício e com a escolha dos materiais de revestimento interno. Caso contrário, o caudal total de ar novo, definido para a ocupação humana e para a remoção de poluentes do edifício, é incrementado em 50%.

Relativamente à concepção dos sistemas de climatização, o RSECE impõe genericamente um sistema com produção centralizada de calor e frio, introduz limites à potência instalada em função da carga térmica calculada, impõe a utilização de energias renováveis e, em determinados casos, sistemas de cogeração. São definidos sistemas de recuperação de energia em modo de aquecimento, para sistemas cujo ar de rejeição contenha uma carga térmica superior a 80 kW; é imposto o arrefecimento gratuito aos sistemas com caudal de insuflação superior a 10.000 m³/h. Caldeiras, bombas de calor e motores deverão ter rendimentos ou eficiências mínimas; haverá repartição das potências de aquecimento e limitação do aquecimento por efeito de Joule a 5% da carga de aquecimento ou a 25 kW; e as condutas e tubagens terão espessuras mínimas de isolamento. Os sistemas preconizados em projecto regularão a temperatura, terão regulação de potência, quer de aquecimento, quer de arrefecimento, e apresentarão controlo horário. Os equipamentos eléctricos de potência superior a 12 kW, ou os térmicos de potência superior a 100 kW, terão contadores individuais de energia.

O conjunto de medidas proposto pelo RSECE pode ser complementado, *mutatis mutandis*, por “medidas transversais para aumento da eficiência energética da indústria” [5.2]. Este documento abrange sistemas que utilizem motores eléctricos, produção de frio e de calor e iluminação. Para sistemas com accionamento com motores eléctricos, propõe nomeadamente a utilização de motores mais eficientes, variadores electrónicos de velocidade, conversão de sistemas de velocidade constante para velocidade variável, correcta selecção de bombas e ventiladores e redução de fugas de fluidos. Promove ainda a utilização de sistemas de cogeração, de caldeiras mais eficientes, de isolamentos, de economizadores para pré-aquecimento e de recuperadores de calor. No que diz respeito ao frio industrial, preconiza a utilização de sistemas de melhor eficiência e com novos fluidos refrigerantes. Finalmente, pretende a substituição de lâmpadas e de luminárias por outras mais eficientes, e o controlo do fluxo luminoso.

5.5.3 A norma EN 15251

Existem diversas normas que podem ser associadas à implementação da EPBD, algumas das quais anteriormente referidas. Outras, relativas aos requisitos das instalações, à avaliação do seu desempenho e a inspecções de equipamentos, tendem a completar a normativa necessária à efectivação da EPBD.

Por mandato da Comissão Europeia, foi edificada a norma EN 15251 [5.27], de modo a congregar a aplicação desse conjunto de normas, com vista à “concepção e avaliação do desempenho energético das instalações, do conforto térmico, da qualidade do ar interior, da iluminação e da acústica”. É referido na EPBD que uma declaração para a energia tem de salvaguardar o conforto e saúde dos ocupantes dos edifícios. Um dos resultados é a proposta que o certificado energético do edifício exiba (artº 7 da EPBD) “a gama de temperaturas interiores recomendadas e a verificada e, se for caso disso, outros factores climáticos relevantes”. É dentro deste espírito que a EN 15251 estabelece requisitos para o conforto térmico, a qualidade do ar interior, a iluminação e o ruído [5.28], dando indicações relativas a parâmetros para dimensionamento das instalações.

Como parâmetros de dimensionamento da qualidade do ambiente interior, são usados indicadores para o conforto térmico de Verão e de Inverno, utilizando o índice VMP ou a temperatura interior, não estando incluídos indicadores de desconforto relativo a assimetrias radiantes; para a qualidade do ar interior é utilizada a taxa de ventilação, por área ocupada, por pessoa ou ainda pela comparticipação de ambas. Este valor pode ainda ser obtido da diferença de concentração de CO₂ entre o ambiente interior e o exterior. A humidade relativa pode, na generalidade das situações, não ser controlada.

A avaliação da energia consumida ao longo do ano utiliza estes parâmetros e os limites para eles definidos, numa simulação dinâmica horária conjunta do edifício e do seu sistema de climatização. Esta simulação permite obter a evolução dos parâmetros referidos, com vista à classificação do edifício em categorias de qualidade.

A norma define quatro categorias de qualidade (I, II, III e IV). Pretende-se que estas categorias sejam aplicadas à qualidade dos ambientes interiores, muito embora nas normas respectivas estas possam ser designadas por outros símbolos com o mesmo significado. A categoria II será a correspondente às aplicações correntes de novos projectos, a categoria III é aceitável em edifícios existentes e a IV aceite apenas por breves períodos ao longo do ano. A categoria I é reservada a instalações com elevados níveis de expectativa de qualidade, nomeadamente em instalações com pessoas debilitadas.

Um edifício é de uma categoria relativamente a um parâmetro, se 95% do espaço ocupado do edifício pertencer a essa categoria no que respeita a esse parâmetro. Cada espaço pode ter variações do parâmetro em análise, por períodos limitados de tempo, nos quais não cumpra a categoria pretendida. A norma considera aceitável uma percentagem de

tempo de não cumprimento do parâmetro de 3 a 5%. No quadro seguinte listam-se os limites de tempo máximos de exposição a uma categoria diferente¹⁴ da pretendida, que poderão ocorrer conjuntamente durante o período de trabalho.

3% (5%)	Em minutos num dia	Em horas numa semana	Em horas num mês	Em horas num ano
Em período de trabalho	15 (24)	1 (2)	5 (9)	61 (108)

Quadro 5.1. Limites em tempo de não cumprimento do parâmetro (Valores referentes à percentagem de 5% entre parêntesis)

No caso das condições de conforto térmico, a variação do parâmetro pode ser expressa pelo número de graus dia fora do intervalo definido, ou pelo número de horas afectado do índice de PPI.

As categorias relativas aos parâmetros analisados permitem caracterizar um edifício. Por exemplo, relativamente ao conforto térmico, um edifício poderá ser de categoria II no Verão e ser de categoria III no Inverno. Poderá ter ainda outra categoria relativamente à qualidade do ar interior.

Da simulação do comportamento do edifício extrai-se a sua “impressão digital” relativa aos parâmetros escolhidos. A simulação deve ser feita em fase de projecto e as condições preconizadas deverão ser confirmadas após a entrada do edifício em funcionamento.

A “impressão digital” pode ser expressa de forma gráfica, tal como exemplificado na EN 15251:

Qualidade do ambiente interior em % temporal em quatro categorias				
Percentagem	5	7	68	20
Ambiente Térmico	IV	III	II	I
Percentagem	7	7	76	10
Qualidade do Ar Interior	IV	III	II	I

Figura 5.3. “Impressão digital” do edifício relativamente à qualidade do ambiente interior

¹⁴ A norma é omissa relativamente à pertença a uma categoria superior.

5.6 Barreiras à Introdução de Tecnologias mais Eficientes

Ao longo dos parágrafos 5.4 e 5.5 foram indicadas algumas medidas com vista à redução do consumo de energia nos edifícios, nomeadamente nos edifícios de serviços. Estas medidas envolvem a utilização de tecnologias mais eficientes, que representam geralmente um sobrecusto de investimento. A chave da instalação destas tecnologias reside na possibilidade do seu sobrecusto ser pago pelos benefícios da sua utilização. Assim, interferem directamente neste processo as variáveis relativas a: anos de amortização do investimento; capacidade de investir; horas anuais de utilização da tecnologia; e sobrecusto relativo a uma tecnologia menos eficiente.

Os anos de amortização do investimento dependem sobretudo do tipo de investidor. Um utilizador final tende a considerar mais anos na amortização do investimento do que um investidor especulativo. Este pretende, normalmente, cumprir apenas as cláusulas obrigatórias. A imposição de regulamentos energéticos, como os recentemente publicados, origina maiores exigências iniciais, mas que são amortizadas por menores custos de exploração.

A capacidade de investir associa-se ao sobrecusto da tecnologia. Reduz-se esta barreira pela divulgação das tecnologias, a doação de benefícios imediatos ou a criação de linhas de crédito especiais. Consumidores informados tendem a ter comportamentos de melhor eficiência energética do que os menos informados. Com as mesmas tecnologias, aqueles podem consumir menos 10% do que os menos informados [5.29]. Para este efeito, é necessário criar campanhas sistemáticas de sensibilização dos consumidores, por forma a evitar hiatos de eficiência por escolhas incorrectas. Um exemplo de hiato de eficiência foi identificado no comportamento dos consumidores nos EUA, que preferiam numa relação de 10 para 1 os balastros comuns aos electrónicos que, sendo mais eficientes, permitiam pagar a diferença de preço em dois anos [5.30].

A possibilidade de amortização é, por último, dependente do número de horas anuais de utilização. Uma tecnologia para aquecimento ou climatização terá menos horas de funcionamento num clima mais ameno. Portanto, as tecnologias mais rentáveis para estes climas serão geralmente menos eficientes do que as utilizadas em climas mais adversos. Esta hipótese é corroborada por avaliações dos consumos de energia nos países do Norte e do Sul da Europa. Ao maior consumo *per capita* nos países do Norte da Europa corresponde menor energia para aquecimento por unidade de área útil e grau-dia (GD). O consumo energético para aquecimento na Suécia e na Holanda é de $46 \text{ W}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{GD})$, na França de $77 \text{ W}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{GD})$ e na Grécia de $73 \text{ W}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{GD})$ [5.31].

No entanto, os consumos médios de electricidade e de energia total por pessoa·ano no sector residencial variam de forma diferente: o de electricidade é em Portugal e na Itália de

cerca de 1.000 kW·h, no Reino Unido e em França de 2.000 kW·h e de 4.500 kW·h na Suécia. O consumo da totalidade de energia do país por pessoa·ano é de 3.370 kW·h em Portugal, em Espanha de 3.600 kW·h, atinge 11.400 kW·h na Finlândia e é de 17.700 kW·h no Luxemburgo. Estes últimos valores são comparáveis aos 10.350 kW·h que ocorrem nos EUA e aos 11.160 kW·h do Canadá.

Outras vezes, é a própria estrutura política que cria barreiras, ao articular incentivos de mercado mal orientados; políticas fiscais distorcidas; não taxação de custos sociais inerentes a tecnologias poluentes; utilização geral de serviços públicos sem os custos inerentes; ou informação insuficiente ou incorrecta.

O próprio mercado reage por vezes de forma distorcida. Tal ocorre quando os consumidores dão uma baixa prioridade aos problemas de energia; quando as taxas de acesso ao crédito são variáveis e podem comprometer a decisão de consumidores de menores posses; quando produtos energeticamente mais eficientes não são comercializados; ou quando os mercados não têm capacidade técnica de realizar uma instalação correcta [5.30].

Finalmente, a impossibilidade física de instalação, ou a instalação sem interesse psicológico, determinam em muitas situações a inviabilidade da tecnologia. São exemplos a dificuldade na instalação de painéis solares, em edifícios sem uma vertente no quadrante sul; a dificuldade de utilização de sistemas de recuperação de energia das redes de ar condicionado pela falta de espaço para condutas de retorno às unidades; a utilização de bombas de calor para aquecimento de águas quentes sanitárias, caso não haja espaço disponibilizado para a sua instalação; etc.

5.7 Rumo à Sustentabilidade

A sociedade, como hoje a conhecemos, enfrenta o grande desafio de conseguir desenvolver-se sem poluir. A eficiência energética parece não ser a solução para tal problema, mas o retorno a uma economia agrária também não é a solução. Se a economia pudesse assentar hoje num modelo agrário, a produtividade por hectare da produção de biocombustíveis teria de ser 30 vezes superior aos valores fisicamente possíveis. Assim, resta como possível solução o controlo do consumo de energia¹⁵. Este controlo trará alterações profundas no modo de vida, na organização das sociedades, com reflexos na organização das cidades e no modo de construção dos edifícios. Estas alterações, mesmo que venham a existir de modo planeado e no sentido correcto, serão sempre lentas. Note-se

¹⁵ Warde, 2007, Science Daily (24/10/ 2007).

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

que a expansão do consumo de petróleo, como alternativa ao carvão, demorou cerca de cinquenta anos a passar de 2% das necessidades de energia em 1920, para 50% em 1973.

O modelo de desenvolvimento terá de ser diferente! O relatório da Agenda 21¹⁶, sobre sustentabilidade de construção, refere que os primeiros modelos de desenvolvimento, provavelmente ainda os mais usados, visam o equilíbrio entre custos, qualidade e tempo. Posteriormente, os modelos de sustentabilidade foram estabelecidos a partir de uma relação entre recursos, emissões e biodiversidade. Actualmente, os modelos de desenvolvimento devem ser escolhidos mediante um determinado contexto cultural, fruto de um equilíbrio entre constrangimentos económicos, qualidade ambiental e igualdade social. Esta é a nova abordagem para a construção sustentável, que terá forçosamente abordagens diferentes em países diferentes.

O Relatório Brundtland (1987) definiu o desenvolvimento sustentável como o "desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades." Casas com condições adequadas e as necessidades de uma crescente população mundial representam o grande desafio deste século. A Agenda 21, no seu Capítulo 28, "Agenda 21 Local", foca a necessidade de implementar acções reais ao nível do desenvolvimento das cidades.

A proposta de norma ASHRAE 189P sobre sustentabilidade nos edifícios e da ASHRAE 191P sobre conservação de recursos de água pretendem dar um forte contributo para a aplicação do conceito de sustentabilidade nos edifícios. A proposta visionária da ASHRAE, a ASHRAE Vision 20/20, é a de fornecer para todos os tipos de edifícios, até 2020, directivas que lhes permitam funcionar com balanço nulo de energia¹⁷. Esta proposta tem tido adesão em algumas agências federais de energia, pretendendo-se que, em 2030, existam diversos edifícios com balanço nulo de consumo de energia (ZEB¹⁸). A aplicação deste conceito implica a redução das cargas internas, de modo a que sistemas renováveis possam garantir as necessidades de frio e calor, assim como as de iluminação e de energia eléctrica. Este conceito é por vezes interpretado como balanço nulo do fluxo de energia, ou ainda como balanço nulo dos custos de energia.

Transformar edifícios existentes em edifícios ZEB, ou projectar edifícios ZEB, implica alterações profundas na concepção urbana. Cerca de 80% dos edifícios com um piso poderão ser transformados em edifícios ZEB, apenas cerca de 50% dos de dois pisos e só 10% dos de três [5.32]. Obteve-se uma conclusão semelhante para um edifício em Abu Dhabi, onde se previu que para ter um consumo líquido de energia nulo, teria de ter no máximo 2 pisos. Neste estudo, variou-se as características do isolamento da fachada, do

¹⁶ Organização das Nações Unidas, 1992.

¹⁷ Terry Townsend, presidente da ASHRAE, 2006-2007.

¹⁸ ZEB- "Zero Energy Building", na literatura anglo saxónica.

sombreamento e dos envidraçados e utilizou-se painéis fotovoltaicos com uma eficiência de 15% [5.33]. A altura de um edifício será um dos elementos base para a construção de edifícios sustentáveis e um guia para a reconstrução dos existentes.

A proposta de revisão da nova EPBD (2009) pretende igualmente que em 2020 os novos edifícios tenham um consumo de “quase zero” e que a energia consumida nesses edifícios seja preponderantemente de origem renovável [5.34].

A construção de edifícios novos sustentáveis não é necessariamente mais dispendiosa do que a dos edifícios comuns, desde que na fase de projecto sejam tomadas as opções correctas. No entanto, a renovação de edifícios existentes de modo a torná-los menos dependentes de energia pode ter custos elevados. A sociedade poderá necessitar de renovar grande parte dos seus edifícios, incorporando novas tecnologias pouco consumidoras de energia e materiais clássicos com baixas necessidades de manutenção [5.35].

A redução do consumo de energia de um sistema de climatização deve ser integrada no edifício em que se insere, cujo consumo depende ainda da organização urbana [5.36]. Por vezes, são possíveis reorganizações urbanas pela inclusão e alteração de elementos arquitectónicos, sem alterações profundas do contexto local [5.37].

É neste ambiente de incerteza relativamente aos custos de energia, à proveniência de recursos energéticos e às correctas políticas a seguir, que o desenvolvimento do paradigma da sustentabilidade permite alimentar o optimismo epistemológico da procura de soluções.

5.8 Energia em Edifícios - Funções e Parâmetros

O mapeamento entre funções e parâmetros, com vista à redução do consumo de energia, que a seguir se apresenta, constitui um pequeno contributo na linha de sustentabilidade apresentada.

Para efeitos deste trabalho consideraremos que existe um projecto de um edifício em que é definida a sua orientação, pisos, áreas, fachadas, vãos envidraçados e demais elementos de arquitectura. Considera-se ainda que o edifício é de serviços, com elevadas cargas internas. À redução das cargas internas neste tipo de edifícios corresponde, normalmente, uma redução do consumo de energia.

As conclusões desta secção podem ser usadas no projecto de um sistema de climatização, servir como guia para criar um código de projecto, ou enquadrar a reformulação de regulamentos sobre energia em edifícios.

É de realçar que a aplicação da AP ao projecto de sistemas não permite a sua imediata transposição para regulamentos. Ontologicamente, o projecto e os regulamentos são diferentes. No projecto, pretendem escolher-se parâmetros com o objectivo de cumprir um

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

conjunto de funções. Os regulamentos são uma mistura ordenada de exclusões, restrições, funções de diversos níveis e gamas de variações de funções ou de parâmetros. No entanto, o processo de mapeamento exposto nos pontos seguintes permite acompanhar a criação de regras. Este processo segue genericamente um artigo da nossa autoria apresentado num congresso da ICAD [5.38].

Pressupõe-se que a maioria das funções e parâmetros de projecto, necessários à redução do consumo de energia em edifícios, estejam presentes na legislação e regulamentos sobre essa matéria. Para o efeito, utilizou-se os regulamentos provenientes da transposição da directiva EPBD em diversos países da UE e a ASHRAE 90.1. Serão ainda considerados os conceitos físicos associados ao projecto de uma instalação. Ao desenvolver-se o mapeamento relativo ao consumo de energia, estrutura-se o conhecimento sobre esta matéria, o que permite identificar falhas ou pressupostos existentes nas regulamentações referidas.

Estas regulamentações servirão de base para as opções tomadas, mas não se pretende comparar as transposições da EPBD dos países analisados. As regulamentações acedidas não são, geralmente, o texto completo relativo à redução do consumo de energia em edifícios. Em vários países, a transposição da directiva apela a outros decretos locais ou normas.

5.8.1 O mapeamento da função de redução do consumo de energia em edifícios

O cálculo de cargas térmicas em Climatização considera relevante a ocupação humana, a carga de equipamentos, a de iluminação e a do ar novo. Considera ainda as trocas de calor pela envolvente, em particular a condução por paredes, pavimentos e coberturas, bem como os ganhos solares. São ainda contabilizadas as cargas produzidas pelo funcionamento de motores eléctricos e por outros sistemas de potência.

Estes tópicos fornecem pistas importantes, para enunciar o conjunto de funções que preenchem a função geral de “reduzir o consumo de energia em edifícios”. Em consequência, propõe-se as seguintes funções: “adequar a inércia do edifício”, “ajustar características da envolvente do edifício”, “reduzir a carga interna”, “reduzir o consumo de energia dos sistemas” e “produzir energia localmente de modo eficiente” (mais eficiente que a disponibilizada nas redes urbanas).

A Figura 5.4 apresenta, na página 171, o diagrama de mapeamento das funções referidas até ao segundo nível de decomposição.

Os parâmetros folha são o PP 2.1, massa por unidade de superfície, de materiais de construção que permitem a acumulação de energia; o PP 2.2, coeficiente de transmissão de calor, médio da envolvente, cuja variação aumentará ou reduzirá o fluxo de calor para o exterior; o PP 2.3, fracção solar dos envidraçados, ou melhor o produto da área de

envidraçados, com orientação significativa para obtenção de ganhos solares, pelos respectivos factores solares; o PP 2.4, o número de pessoas, parâmetro normalmente pré-definido; o PP 2.5, eficiência dos equipamentos interiores, que engloba todos os equipamentos, normalmente eléctricos, excepto luminárias, presentes em ambientes de escritórios; o PP 2.6, a eficiência do sistema de iluminação; o PP 2.7, caudal de ar novo, em particular aquele que é dependente do número de pessoas; os PP 2.8 a 2.10, relativos à escolha das eficiências de sistemas de potência, de aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) e do sistema AVAC; e finalmente os PP 2.11 a 2.13, relativos à autoprodução de energia.

As relações entre os requisitos funcionais e os parâmetros de projecto são expressas na equação (5.1), na qual, para facilidade de leitura, são inscritas na matriz de projecto linhas a cheio na separação entre níveis de decomposição e linhas tracejadas nos sub-níveis correspondentes. Inclui-se ainda as funções de nível mais elevado relativas ao conforto e à qualidade do ar no edifício, agora designadas por RF 0.1 e RF 0.2. A equação (5.1) mostra que o ajuste da envolvente pode ter um papel importante na redução do consumo de energia. Esta relação é expressa no bloco da matriz de projecto com as relações entre RF 1.2 e RF 1.3. Esta relação indica que RF 1.2 depende de RF 1.3, ou seja, as características da envolvente deveriam ser ajustadas após conhecimento da carga interna a remover. Provavelmente, a principal conclusão desta relação é a necessidade de aferir o coeficiente de transmissão de calor depois de calcular a carga interna do edifício, conforme expresso na linha de RF 2.2. Por outro lado, o coeficiente de transmissão de calor da envolvente interfere na carga do edifício. Estas relações não são normalmente consideradas num processo comum de projecto, sendo utilizados os valores definidos em regulamentos. Na realidade, é difícil estimar as características da envolvente face à incerteza sobre a ocupação, utilização e evolução do uso de um edifício, ao longo do seu ciclo de vida.

Na envolvente, a definição dos envidraçados deve depender das necessidades de iluminação. No entanto, fluxos de energia elevada pelos envidraçados causam encadeamento. Ao serem reduzidos, implicam a alteração do sistema de iluminação em zonas internas do edifício, pelo que há uma relação entre os ganhos solares e a carga de iluminação proveniente de um sistema de iluminação activa. Assim, existe um acoplamento entre a definição dos envidraçados e o funcionamento de um sistema de iluminação activa, cuja relação é identificada nas linhas de RF 2.3 e RF 2.6. A absorção da radiação solar depende ainda ligeiramente da inércia do edifício, tal como referido na linha de RF 2.3.

O caudal de ar novo depende do número de pessoas e interfere na qualidade do ar interior. A utilização de “o” pretende significar que, na relação assinalada, existe a impossibilidade real de alteração do número de pessoas na equação de projecto. Note-se que o caudal de ar novo pode ainda contribuir para a remoção da carga interna em

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

situações de arrefecimento, quando a entalpia, ou temperatura do ar exterior é inferior à do ar nas condições médias interiores (RF 2.7 é filha de RF 1.3)

RF0.1	X									PP0.1
RF0.2	X									PP0.2
RF0.3		X								PP0.3
RF1.1			X							PP1.1
RF1.2			X	X						PP1.2
RF1.3				X						PP1.3
RF1.4				X	X					PP1.4
RF1.5					X					PP1.5
RF2.1					X					PP2.1
RF2.2				X	X					PP2.2
RF2.3				x	X		X			PP2.3
RF2.4					X					PP2.4
RF2.5						X				PP2.5
RF2.6					X		X			PP2.6
RF2.7					o		X			PP2.7
RF2.8							X			PP2.8
RF2.9							X	X	X	PP2.9
RF2.10								X	x	PP2.10
RF2.11									X	PP2.11
RF2.12									X	PP2.12
RF2.13									X	PP2.13

(5.1)

Finalmente, deve salientar-se que o sistema de águas quentes sanitárias (AQS) deve ser definido após ponderação sobre os sistemas locais de produção de energia e do AVAC.

Para resolver os acoplamentos referidos, é comum fixar-se a condutibilidade das paredes, os envidraçados e o caudal de ar novo, definindo-se depois o sistema de iluminação e o sistema de AVAC. Mais uma vez, os regulamentos permitem fixar os parâmetros referidos. O sistema torna-se assim desacoplável, mas o projecto resultante pode não ser o de melhor desempenho energético para o edifício.

Retornando ao parágrafo 5.5, é de notar que todas as legislações de transposição da directiva referem o parâmetro PP 2.1, ou inércia; indicam valores mínimos ou de referência para o coeficiente de transmissão de calor, PP 2.2; o parâmetro PP 2.3, “fracção solar dos envidraçados”, é referido na generalidade das transposições da directiva, sendo que a do Reino Unido e a irlandesa são associados à iluminação.

O “número de pessoas”, PP 2.4, não é directamente referido, mas são indicados valores típicos nas normas EN 13779 e EN 15251. A “eficiência dos equipamentos interiores”, PP 2.5, não é referida na transposição da directiva 2002/91, mas é enquadrada pela directiva europeia 2005/32 relativa à concepção de produtos ecológicos que consomem energia. A marcação CE passará a ser aplicada a produtos que cumpram os requisitos da directiva 2005/32. Esta directiva foi transposta para a legislação nacional pelo decreto-lei 26/2009. A “eficiência do sistema de iluminação”, PP2.6, surge na transposição espanhola, irlandesa e do Reino Unido. Na legislação nacional, esta eficiência é controlada

indirectamente pelo consumo máximo do edifício. O “caudal de ar novo”, PP 2.7, é referido nas transposições de Espanha, do Reino Unido e da Irlanda, sendo incorporado na legislação nacional como requisito de QAI. É geralmente prescrito um valor mínimo que garanta uma categoria de qualidade do ar, dado que ao aumento do caudal de ar novo é associado o aumento do consumo de energia.

A “eficiência do sistema de potência”, PP 2.8, e de AQS, PP2.9, é referida na generalidade das regulamentações, nomeadamente na ASHRAE 90.1, na inglesa, na espanhola e na portuguesa. O PP 2.10, “eficiência do sistema de AVAC”, será alvo de decomposição mais detalhada no próximo parágrafo.

Finalmente, os parâmetros PP 2.11 a 2.13, relativos aos sistemas locais de produção de energia, surgem de diversas formas nas diversas transposições dos países, especialmente como sistemas de painéis solares para aquecimento de águas sanitárias, sistemas fotovoltaicos e sistemas de cogeração.

Os parâmetros PP 2.1 a PP 2.7 podem ser considerados intrínsecos à construção de um edifício. A sua variação será analisada no capítulo seguinte.

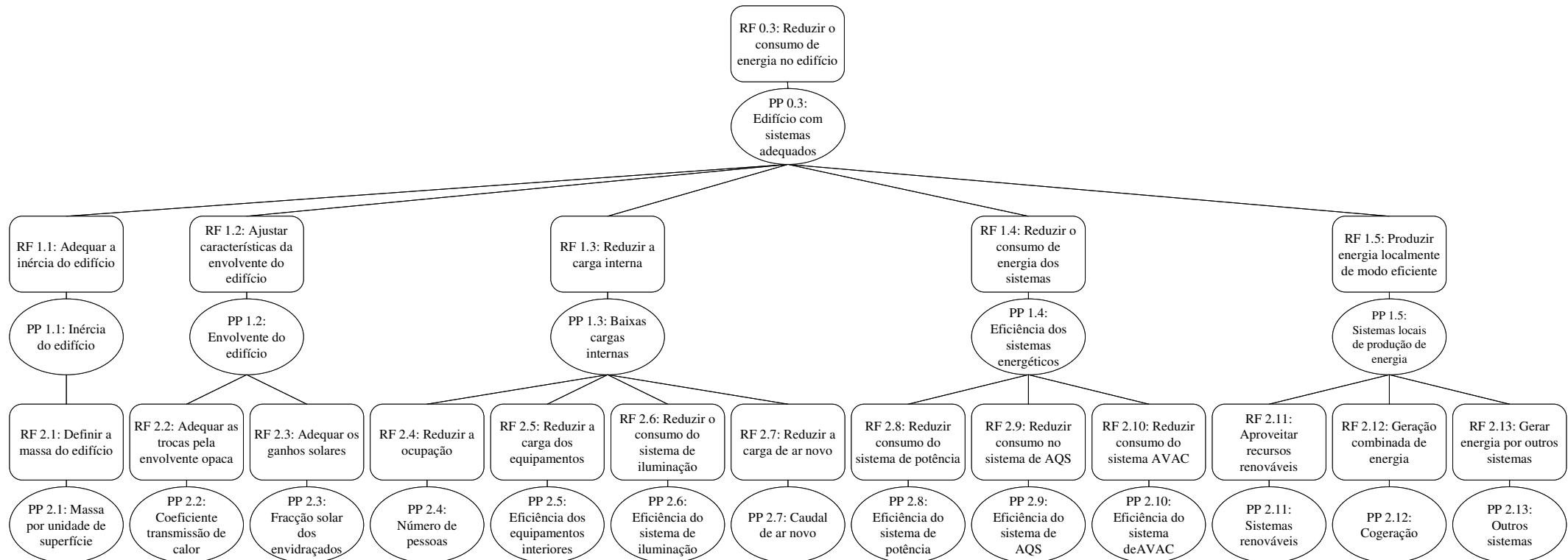
5.8.2 O mapeamento aplicado aos sistemas de climatização

Da decomposição do requisito funcional RF 2.10, “reduzir consumo de energia do sistema AVAC”, obtém-se as funções relativas a “adequar os caudais”, “recuperar energia”, “escolher eficiência dos equipamentos” e “definir condições de projecto eficientes”. A Figura 5.5 (pag. 175) mostra o processo de decomposição da função RF 2.10 até ao nível 5 de decomposição.

O preenchimento do requisito RF 2.10 é obtido por correcta escolha dos PPs de níveis inferiores. Ou seja, é necessário adequar os caudais de água por correcta selecção dos grupos moto-bomba de caudal variável associados a válvulas de controlo do fluxo de água nas diversas unidades; e adequar o caudal de ar por utilização de grupos moto-ventiladores nas UTAs, com um correcto caudal de ar novo, fornecendo localmente o caudal necessário.

“Recuperar energia” pela utilização de recuperadores de calor ou economizadores nas UTAs, permitindo o arrefecimento gratuito e recuperando o calor libertado para a geoesfera pelos grupos de produção (GPFCs ou caldeiras). “Escolher eficiência dos equipamentos” utilizando em particular motores com classificação EFF de eficiência superior e GPFCs e caldeiras de elevada eficiência. Em particular, o GPFC deverá ter elevado rendimento em condições nominais, designado por EER, índice proposto pela EUROVENT. Deverá ainda ter elevado rendimento sazonal, para o que é comum utilizar-se o índice ESEER. Genericamente deve funcionar com temperaturas de evaporação e de condensação tão próximas entre si quanto possível e ter controlo a cargas parciais.

Figura 5.4. Mapeamento da função “reduzir o consumo de energia no edifício”



De igual modo, o sistema de aquecimento deve ter controlo de carga e apresentar elevado rendimento. Por último, é necessário adequar as perdas de carga nas redes de água e de ar, definir as condições de temperatura em modo de arrefecimento e de aquecimento, para as referidas redes, e definir os isolamentos e a classe de fugas do circuito aerífero.

Em termos genéricos, todos os parâmetros utilizados surgem nos regulamentos previamente apresentados. Por confirmação, avalie-se as referências aos parâmetros do nível quatro presentes nas diversas regulamentações. Os sistemas de caudal de água e de ar variável, PP 4.1 e PP 4.2, não são impostos em nenhuma legislação, mas são referidos ou recomendados na ASHRAE 90.1, na legislação do Reino Unido, na espanhola ou na portuguesa. Os parâmetros relativos à recuperação de calor associados ao caudal de ar, PP 4.3 e PP 4.4, surgem na generalidade das legislações. A recuperação de calor no equipamento de produção, PP 4.5, aparece recomendada de forma clara na ASHRAE 90.1. As eficiências mínimas de equipamentos, nomeadamente motores, PP 4.6, GPFCs, PP 4.7, ou caldeiras, PP 4.8, têm valores prescritos nas diversas legislações. A perda de carga, PP 4.9 dos circuitos hidráulicos e aeríferos surge apenas indirectamente pela imposição de limites à energia por unidade de caudal associada às UTA's (SFP¹⁹). Estes limites surgem na legislação do Reino Unido, na irlandesa e na ASHRAE 90.1. A legislação espanhola impõe ainda limites à perda de carga de diversos componentes da instalação e a ASHRAE 90.1 impõe limitações à utilização de bombas de elevada potência. Nas restantes legislações, a perda de carga nos circuitos hidráulicos ou aeríferos é considerada na contabilização do consumo de energia total do edifício.

O parâmetro relativo a limites para as temperaturas de funcionamento dos circuitos aeríferos é geralmente indicado em códigos, ao contrário da temperatura de redes hidráulicas, que raramente é definida (PP4.10). Finalmente, os parâmetros relativos a tipo de isolamento, PP 4.11, e classe de fugas das tubagens, PP 4.12, são referidos na transposição das directivas espanhola, do Reino Unido e irlandesa e, igualmente, na ASHRAE 90.1.

Por outro lado existem indicações nas normas que estão omissas na decomposição realizada. O sistema de controlo dos parâmetros enunciados aparece reiteradamente na legislação do Reino Unido e na ASHRAE 90.1. No mapeamento efectuado, as funções e parâmetros relacionados com o sistema de controlo não surgem de forma explícita. No entanto, estão implícitos em qualquer das funções iniciadas por “controlar” ou “ajustar”. Estes sistemas surgiriam em níveis de maior detalhe.

¹⁹ SFP – Specif fan power

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Alguns regulamentos têm proibições relativas, por exemplo, ao aquecimento e arrefecimento simultâneo ou ao aquecimento por efeito de Joule. Estas exclusões não surgem na decomposição funcional de um projecto pelas razões ontológicas referidas. Outras referências, sobre características dos equipamentos associadas ao conforto ou à qualidade do ar, surgiriam na decomposição das funções apresentadas no Capítulo 3. Finalmente, as referências relativas a verificações do consumo de equipamentos pretendem evitar a escolha de equipamentos com consumos considerados elevados.

As relações entre os diversos requisitos funcionais e os respectivos parâmetros de projecto são evidenciadas na matriz de projecto representada na equação (5.2). Esta equação assinala que a perda de carga e as temperaturas de funcionamento dos circuitos interferem em diversas funções, PP 4.9 e PP 4.10. As equipas de projecto normalmente assumem estas condições na fase inicial de projecto, ou adoptam os valores normalmente usados pelos mercados. Caso estas condições sejam definidas, ou assumidas, o projecto torna-se independente.

A equação (5.2) destaca que a recuperação de calor do ar de exaustão, RF 4.3, deve considerar a perda de carga disponível. A definição de uma perda de carga máxima nos recuperadores permite limitar a desvantagem enunciada. Esta prescrição surge nomeadamente na legislação espanhola. Um efeito análogo surge quando se considera uma recuperação de calor no equipamento de produção, RF 4.5, que implica necessariamente um aumento de perda de carga e de consumo de energia associado. Caso os períodos de recuperação de calor sejam pequenos e o funcionamento dos sistemas de recuperação constante, a utilização de recuperadores pode ser contraproducente.

A selecção da eficiência dos GPFCs, RF 4.7, e das caldeiras, RF 4.8, depende das temperaturas dos circuitos de ar e água (PP 4.10). Quanto mais elevada a temperatura da rede de água fria, melhor a eficiência do GPFC, mas maiores serão os caudais de água e de ar movimentados e maior a dimensão dos permutadores. Um efeito similar ocorre com a redução da temperatura do circuito de água quente. O parâmetro referido, PP 4.10, interfere ainda na definição das temperaturas de funcionamento do GPFC (RF 5.7 e RF 5.8). Um efeito semelhante ocorre pela dependência entre RF 4.7 e a existência de recuperação no GPFC, PP 4.5.

Finalmente, os isolamentos das condutas, tubagens e equipamentos, RF 4.11, são dependentes da temperatura dos circuitos, PP 4.10. Em certa medida, a perda de pressão dos circuitos, PP 4.9, interfere na classe de fugas das condutas, PP 4.12.

A resolução do acoplamento presente na equação referida passa geralmente por assumir no projecto os valores típicos de mercado para os parâmetros PP 4.9 e PP 4.10, esquecendo-se propositadamente a sua importância no consumo de energia de uma instalação. Há, no entanto, que referir que, actuando nos parâmetros referidos, no sentido

da redução do consumo de energia, implica escolher equipamentos, tubagens e condutas de maiores dimensões.

$$\begin{bmatrix} \text{RF2.10} \\ \text{RF3.1} \\ \text{RF3.2} \\ \text{RF3.3} \\ \text{RF3.4} \\ \text{RF4.1} \\ \text{RF4.2} \\ \text{RF4.3} \\ \text{RF4.4} \\ \text{RF4.5} \\ \text{RF4.6} \\ \text{RF4.7} \\ \text{RF4.8} \\ \text{RF4.9} \\ \text{RF4.10} \\ \text{RF4.11} \\ \text{RF4.12} \\ \text{RF5.1} \\ \text{RF5.2} \\ \text{RF5.3} \\ \text{RF5.4} \\ \text{RF5.5} \\ \text{RF5.6} \\ \text{RF5.7} \\ \text{RF5.8} \\ \text{RF5.9} \\ \text{RF5.10} \\ \text{RF5.11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{X} & & & & & & & & & \\ \text{X} & & & & & & & & & \\ & \text{X} & & & & & & & & \\ & & \text{X} & & & & & & & \\ & & & \text{X} & & & & & & \\ & & & & \text{X} & & & & & \\ & & & & & \text{X} & & & & \\ & & & & & & \text{X} & & & \\ & & & & & & & \text{X} & & \\ & & & & & & & & \text{X} & \\ & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \text{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{PP2.10} \\ \text{PP3.1} \\ \text{PP3.2} \\ \text{PP3.3} \\ \text{PP3.4} \\ \text{PP4.1} \\ \text{PP4.2} \\ \text{PP4.3} \\ \text{PP4.4} \\ \text{PP4.5} \\ \text{PP4.6} \\ \text{PP4.7} \\ \text{PP4.8} \\ \text{PP4.9} \\ \text{PP4.10} \\ \text{PP4.11} \\ \text{PP4.12} \\ \text{PP5.1} \\ \text{PP5.2} \\ \text{PP5.3} \\ \text{PP5.4} \\ \text{PP5.5} \\ \text{PP5.6} \\ \text{PP5.7} \\ \text{PP5.8} \\ \text{PP5.9} \\ \text{PP5.10} \\ \text{PP5.11} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Em consequência, o custo e a energia imbuída nos materiais geralmente aumentam. Pode propor-se como solução a escolha de variáveis de projecto, PP 3.4, que minimizem ou o custo, ou o consumo de energia, ao longo da vida do sistema.

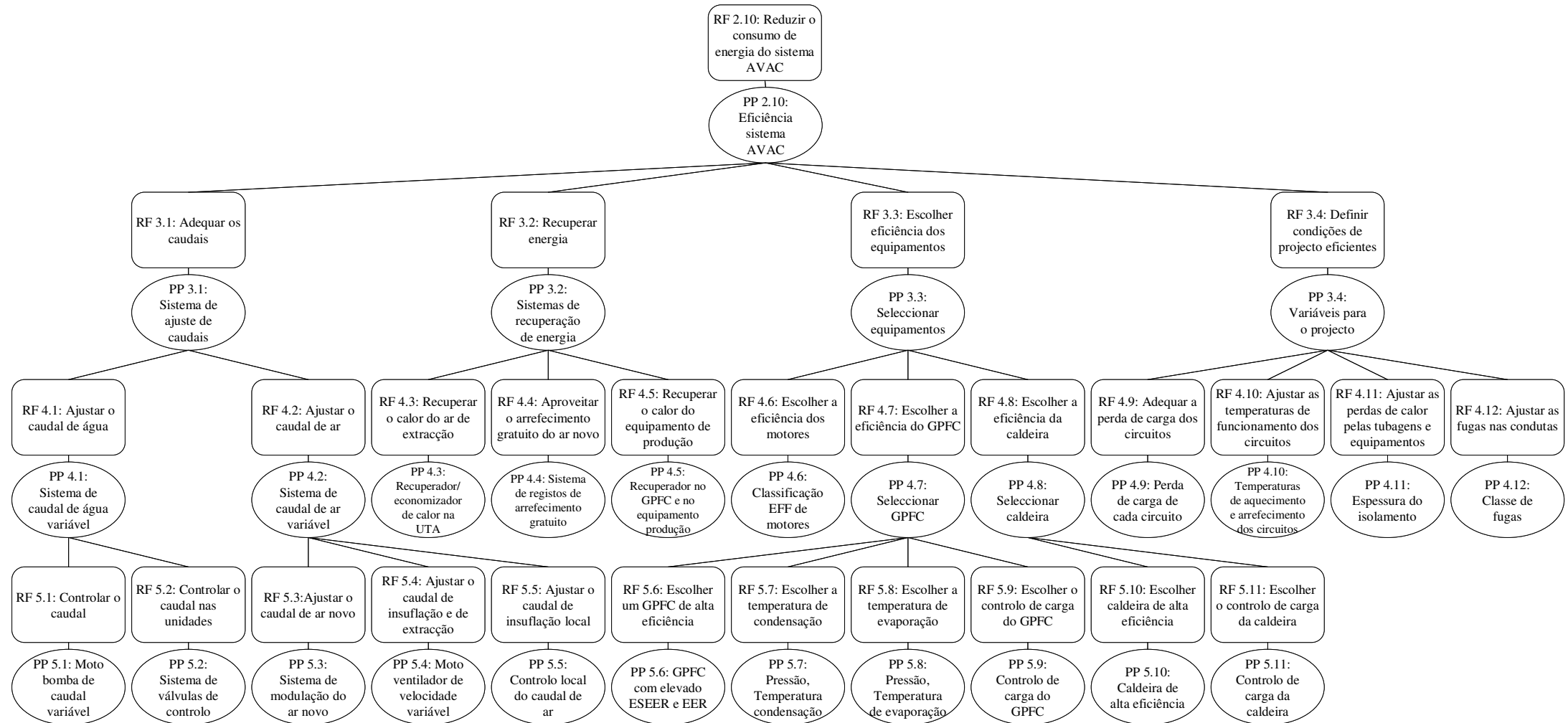
As restantes relações são independentes, ou seja, na fase de projecto podem ser tomadas independentemente umas das outras.

Note-se que os parâmetros de dimensionamento presentes nas equações (5.1) e (5.2) terão necessariamente de ser fixados na fase de projecto. Será conveniente que surjam códigos de boas práticas que ajudem à definição dos parâmetros causadores do acoplamento das matrizes de projecto.

Este esforço de definição seguiria a linha dos diversos “Green Guides” da ASHRAE, do manual de “Comentarios RITE-2007” associado à legislação espanhola, ou das regulações de edifícios da Grã-Bretanha.

No capítulo seguinte aborda-se este assunto, dando-se um contributo para a definição das características de um edifício e em particular para as dos sistemas AVAC.

Figura 5.5. Mapeamento da função “reduzir o consumo de energia do sistema AVAC”



5.9 Resumo e Conclusões

Neste capítulo abordou-se a função relativa à redução do consumo de energia nos sistemas de climatização, enquadrada no âmbito mais vasto dos edifícios de serviços. Avaliou-se ainda as condições de redução do consumo de energia inerentes ao próprio edifício e à sua utilização.

A importância desta função provém da escassez de recursos energéticos. Esta escassez tem provocado instabilidade nos mercados energéticos, como é exemplo o aumento do preço do petróleo para 151 USD em Julho de 2008, com a descida posterior para cerca de 50 USD após a crise de Setembro de 2008.

A necessidade da redução do consumo de energia prende-se, em geral, com a redução de dependência externa de importações de energia e da redução das emissões de gases de efeito de estufa. Assume-se que o aumento da eficiência energética das instalações deverá contribuir para estas reduções. No entanto, ao aumento da eficiência energética está associado uma redução da incorporação do preço da energia, no produto final. Tal é equivalente a uma redução do preço de energia, que conduzirá ao aumento do seu consumo. Assim, a eficiência energética é sobretudo uma medida de carácter económico.

A solução para os problemas enunciados poderá estar na alteração do modelo de desenvolvimento, que deverá passar a basear-se em sistemas sustentáveis. Em particular é necessário equacionar a possibilidade de construir edifícios sustentáveis, com baixo consumo de energia.

Um primeiro passo nesse sentido foi dado pela norma ASHRAE 90.1 e posteriormente pela directiva congénere europeia, EPBD. Esta directiva foi transcrita para a legislação dos diversos países da UE, dos quais se retrataram algumas das transposições. Abordou-se também a norma EN 15251 que pretende apoiar a aplicação da EPBD. O conjunto destes documentos serviu de base para identificar as funções e parâmetros de projecto, da decomposição da função “reduzir o consumo de energia no edifício”.

O conjunto de todo o conhecimento recolhido, nomeadamente normas e legislação de diversos países é, no seu todo, não estruturado. A sua estruturação na forma de mapeamento e de matriz de projecto permite definir um enquadramento geral para o desenvolvimento de trabalhos, com vista à redução do consumo de energia. Os parâmetros de projecto de maior nível de detalhe obtidos são referidos nas diversas legislações, o que permite corroborar as escolhas efectuadas.

Conclui-se que nas diversas transposições da EPBD os parâmetros de dimensionamento das instalações são assumidos como valores típicos ou de mercado, não correspondendo necessariamente aos que serão mais económicos. Os códigos ou normas deveriam incluir valores para estes parâmetros, que no seu conjunto venham a conduzir ao

custo mínimo do edifício no seu ciclo de vida. Estes códigos deveriam ainda tentar resolver a dicotomia entre o sistema de iluminação e os envidraçados.

Como regra metodológica indica-se que as características da envolvente deverão ser definidas após a caracterização do uso do edifício, malgrado a dificuldade em conhecer a evolução do seu uso. Os sistemas de aquecimento de AQS deverão ser considerados após avaliação dos sistemas locais de produção de energia.

5.10 Contributos, Opinião e Prosseguimento

Constituem contributos deste capítulo o mapeamento da função de redução do consumo de energia em edifícios de serviços, com especial ênfase na descrição de um sistema AVAC eficiente. Deste mapeamento identifica-se a dependência das características da envolvente com a carga interna do edifício; a relação entre iluminação natural e artificial; e a possível contribuição positiva do ar novo para a carga térmica.

O mapeamento realizado para o sistema de AVAC realça a necessidade de definição das condições de temperatura das redes, em particular da rede hidráulica; destaca ainda a necessidade de definir limites para as perdas de carga das redes aerífera e hidráulica.

A definição óptima destes parâmetros implica uma avaliação económica não linear, face às relações existentes entre caudal e perda de carga, caudal e diâmetros. Outros tópicos de possível desenvolvimento relacionam-se com a investigação e desenvolvimento de cada um dos parâmetros finais enunciados.

A própria natureza deste capítulo, a energia, sugere outras linhas de desenvolvimento. Seria interessante analisar se o aumento do consumo de energia resulta de um conjunto cada vez maior de funções, ao dispor das sociedades. Numa sociedade de consumo vai-se criando sempre novas funções, que possivelmente necessitam de energia para serem satisfeitas. Nesta hipótese, a contenção do aumento de funções reduziria as necessidades de energia.

É ainda importante conhecer qual a energia realmente necessária à produção nacional. Esta noção permitiria validar o uso do arquétipo da intensidade energética do PIB. É de colocar a hipótese de que, em certa medida, os países com um clima menos rigoroso tenham um menor consumo *per capita*, associado a uma maior intensidade energética do PIB.

Para o modelo de desenvolvimento actual, quiçá ameaçado pelo declínio da exploração de petróleo, há que discutir seriamente a possibilidade de utilização de energia nuclear.

Em alternativa, num cenário de escassez energética, é importante investigar que funções serão eliminadas no futuro e que organização urbana deverá surgir. Será ainda interessante analisar as hipóteses de futuras organizações sociais.

Numa perspectiva mais optimista, é importante saber qual o faseamento de investimento para alterar o panorama das cidades e dos edifícios existentes, de modo a surgirem ambientes sustentáveis para o futuro. Estas alterações implicarão grandes investimentos e consumo de energia, que deverão ser efectuados atempadamente. Só assim será possível criar ambientes sustentáveis sem custos sociais elevados.

Capítulo 6

A Energia e o Edifício

... Não sei por onde vou,
Não sei para onde vou,
- Sei que não vou por aí!
José Régio, in «Cântico Negro»

6.1 Introdução

No capítulo anterior, foram identificados os parâmetros de projecto que interferem no consumo de energia num edifício. Estes parâmetros obtiveram-se a partir da realidade física e de normas que enquadram as medidas de melhoria de eficiência energética. Para o efeito foram identificados os parâmetros relativos ao edifício: a inércia, as características da envolvente, as suas cargas internas, a eficiência dos sistemas energéticos e os sistemas locais de produção de energia. Os dois primeiros são parâmetros construtivos do edifício; as cargas internas dependem da utilização que lhe for dada; os dois últimos dependem dos sistemas que serão instalados no edifício.

Neste capítulo, aplicar-se-á o mapeamento expresso na Figura 5.4 a três exemplos de edifícios de escritórios. Utilizando um dos edifícios, efectuar-se-á também o mapeamento da Figura 5.5, com o propósito de cumprir a função de “reduzir o consumo de energia do sistema AVAC.”

Os edifícios em questão não irão dispor de sistemas locais de produção de energia, pelo que o parâmetro PP 1.5 não será aplicável. De acordo com o tema deste trabalho, será analisada em pormenor a eficiência do sistema AVAC, mas não serão tratados os sistemas energéticos extrínsecos a este sistema (PP 2.8 e PP 2.9).

Consideraremos, no entanto, as influências dos parâmetros PP 1.1 e PP 1.2, relativos à construção do edifício, e do parâmetro PP 1.3, relativo à carga interna.

O parâmetro PP 2.10, “eficiência do sistema AVAC”, será analisado em detalhe.

Cada um dos parâmetros será sujeito a uma variação incremental plausível em Engenharia, analisando-se as suas consequências em termos de consumo de energia. São avaliados os parâmetros relativos à construção do edifício: massa interna do edifício, coeficiente de transmissão da envolvente e factor solar dos envidraçados; e os relativos à carga interna do edifício: ocupação humana, equipamentos, iluminação e ar novo. Não serão analisadas as relações cruzadas entre estes parâmetros.

Esta primeira parte do capítulo seguirá de perto um artigo por nós apresentado em Trento (2004) [6.1].

As variações paramétricas supracitadas foram obtidas a partir de simulações de três edifícios diferentes, situados em Lisboa, com características construtivas e de utilização próprias. A simulação foi efectuada usando o Energy Plus, obtendo-se, hora a hora, as cargas térmicas de cada uma das zonas dos edifícios. As cargas térmicas foram posteriormente processadas externamente em MatLab, o que permitiu obter os resultados anuais das variações paramétricas referidas.

Relativamente à eficiência do sistema de climatização, foram avaliadas as variações conjuntas dos diversos parâmetros de nível inferior presentes na Figura 5.5. Para o efeito escolheu-se um dos edifícios referidos, onde se aplicou a variação conjunta de todos os parâmetros do sistema de climatização. Calculou-se o consumo de energia anual do sistema num programa externo que simula, hora a hora, o comportamento dos diversos componentes do sistema de climatização. Este programa, desenvolvido para o efeito em MatLab, considera as interacções entre os diversos parâmetros do sistema, admitindo condições estacionárias em cada hora. Considerou-se todas as combinações de estados dos parâmetros.

Utilizando os resultados obtidos, identificou-se os parâmetros que determinam a eficiência energética do sistema de climatização, para o exemplo presente. Para o efeito, ajustou-se o consumo de energia do sistema por uma função polinomial. Os coeficientes de ajustamento de maior ordem determinaram os parâmetros relevantes, para o consumo de energia no sistema de climatização.

6.2 O Clima de Lisboa

A modelação do sistema utilizou um clima médio de Lisboa, com definição das condições exteriores hora a hora. A definição de um clima médio para cada localização e, em particular, para as grandes cidades é um problema com diversas soluções. As séries de valores que têm sido propostas tentam conter os valores extremos, de modo a permitir calcular as cargas térmicas. Estas devem ainda ser correctas em termos médios, para que possam ser utilizadas no cálculo de consumos de energia. Para além desta dupla função, as séries discretas de dados climáticos médios diários ou mensais devem simular continuidade nos extremos dos intervalos, o que obriga a ajustar os valores correspondentes. Existe, ou pode existir, uma grande diversidade de perfis para cada localização.

Neste trabalho foi utilizado o ficheiro de dados climáticos de Lisboa, PRT_Lisboa_INETI.epw, gerado com base em dados fornecidos pelo INETI.

O perfil usado no Energy Plus contempla uma temperatura mínima de 4,2 °C e máxima de 35,9 °C. O primeiro valor é próximo ao valor da temperatura de projecto de Inverno com probabilidade de ocorrência de 2,5% para Lisboa/Portela; já o segundo excede a temperatura de 33,3 °C para projecto de Verão, com probabilidade de ocorrência de 99%

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

[6.2], embora inferior ao máximo absoluto de 40,2 °C, ocorrido no período de referência registado nas estações meteorológicas. A temperatura média anual obtida do ficheiro de dados climáticos é de 16,3 °C, próxima do valor de 16,2 °C de Lisboa/Portela [6.3]. O número de graus-dia para aquecimento com base em 20 °C é de 1.747, sendo de 1.727 em Lisboa/Portela; o número de graus-dia de arrefecimento com base em 24 °C é de 146, sendo referido 105 em Lisboa/Geofísico [6.2]. Apesar de se registarem algumas ligeiras divergências entre os dados do ficheiro climático e as medições nas estações meteorológicas, este ficheiro tem sido aceite para a realização de diversos trabalhos de modelação e de certificação de edifícios.

Com base no seu perfil anual de temperaturas horárias, é possível extrair alguns dados de grande interesse para a discussão em curso: a temperatura média anual de Lisboa nos períodos de ocupação típica dos escritórios, entre as 8 e as 20h, é de 18,5 °C, ou de 19,1 °C se considerarmos o período das 9 às 19h. Estes valores são indicadores da possibilidade de utilização de arrefecimento gratuito. É elucidativo desta realidade o facto de se obterem dos dados referidos 372 °C·dia de arrefecimento gratuito, nas horas de ocupação das 8h às 20h, entre os dias 1 de Março e 1 de Novembro, para uma temperatura base de 24 °C.

6.3 O Energy Plus

O programa Energy Plus é uma plataforma do início dos anos 2000 para modelação de edifícios, que considera os efeitos conjuntos dos diversos processos de transferência de calor. Resolve conjuntamente as equações relativas à convecção e à radiação, considera os efeitos da luz do dia e integra o efeito do arrefecimento ou aquecimento, exercido por um sistema de climatização. Para tal, resolve conjuntamente as equações diferenciais que descrevem os diversos fenómenos de transferência de calor. Nesta particularidade distingue-se dos programas precedentes, nomeadamente do BLAST e do DOE-2 desenvolvidos nos finais da década de 1970 e inícios da de 1980.

O programa calcula as cargas térmicas, considerando uma gama de temperaturas de conforto definida pelo utilizador, variando em cada ciclo os dados físicos de execução do programa face às alterações das condições interiores e exteriores. Neste processo, as equações referentes à transmissão de calor são descritas pelas suas funções de transferência. O Energy Plus permite ainda a inclusão de controlo de iluminação por aproveitamento da luz do dia e a definição de sombreamento com geometria variável.

O programa é constituído por diversos módulos autónomos, com controlo hierárquico, com passo de integração inferior a uma hora, definido pelo utilizador.

É um programa “aberto” que permite a adenda de módulos de outras proveniências. Pretende ser uma plataforma de base de cálculo dinâmico de cargas térmicas, sobre a qual outros programas possam interagir. Esta interacção pode tomar a forma de uma interface de

entrada e de saída de dados, como é exemplo o Design Builder, ou de módulos externos que permitam descrever melhor o edifício. O COMIS, que permite a modelação de fluxos de ar no edifício, é um dos exemplos de programas existentes introduzidos no Energy Plus.

A escolha do Energy Plus como ferramenta de cálculo das cargas térmicas horárias dos edifícios simulados deveu-se à facilidade de acesso ao programa, à extensa literatura disponibilizada, aos testes de comprovação realizados em diversas aplicações, ao vasto conjunto de situações cobertas, à possibilidade de apoio e, finalmente, à aceitação do programa na comunidade científica e técnica.

Muito embora o programa permita simular alguns sistemas de climatização, optou-se pela utilização de um modelo simplificado, o Purchased Air, que será descrito na secção 6.6. Com esta opção, o efeito dinâmico do sistema de climatização é incluído no modelo térmico do edifício, e pós processando os dados resultantes, simula-se o funcionamento de qualquer sistema de climatização, sem as limitações impostas pelos sistemas pré-definidos no Energy Plus.

6.4 Parâmetros dos Edifícios

Os edifícios de escritórios têm geralmente valores elevados de cargas internas, de necessidades de iluminação e de caudais de ar novo, quando comparados com outros tipos de edifícios, nomeadamente hotéis ou habitações.

Como referido anteriormente, foram considerados nesta avaliação os parâmetros construtivos PP 2.1, ou inércia, o coeficiente de transmissão térmica de calor da envolvente, PP 2.2, e a fracção solar dos envidraçados, PP 2.3.

Qualquer um dos três edifícios foi simulado numa situação base e nas diversas situações de teste, variando-se um parâmetro de cada vez. Cada parâmetro foi alterado para valores plausíveis, mantendo-se inalterada a geometria e a arquitectura do edifício.

Em Portugal, a construção comum deste tipo de edifícios conduz geralmente a edifícios com inércia média ou forte. Obteve-se o acréscimo de massa interna do edifício variando as paredes interiores, de paredes de tijolo furado de 7 cm com cobertura superficial de gesso, para paredes de tijolo maciço igualmente com cobertura de gesso. Esta alteração aumenta a carga térmica acumulada na massa do edifício, contribuindo para reduzir as necessidades de climatização quando ocorrem extremos de temperatura exterior.

As alterações à envolvente decorreram modificando o coeficiente de transmissão térmica das paredes e o factor solar dos envidraçados. No primeiro caso, a situação base é descrita por parede dupla de tijolo de 11 cm com caixa-de-ar e a alteração corresponde a introduzir isolamento com 5 cm de espessura; no segundo caso, as janelas são alteradas de vidro duplo neutro para vidro duplo de cor cinzenta. Com o aumento do isolamento, as trocas de calor com o exterior são reduzidas, o que permite diminuir as necessidades de aquecimento,

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

mas inviabiliza a remoção de calor quando há necessidade de arrefecimento. A alteração da cor do vidro reduz a fracção solar de radiação que entra no edifício, o que permite atenuar a carga associada, mas reduz também a radiação na gama do visível, que poderá ter de ser compensada com iluminação artificial num edifício de escritórios. Assumiu-se que os sistemas de iluminação teriam controlo de luz solar, garantindo 500 lux nas superfícies de trabalho.

Foi igualmente estudado o efeito de variações no parâmetro PP 1.3, relativo às cargas internas. Este parâmetro é decomposto nos parâmetros PP 2.4, número de pessoas, que se considerou ter um perfil igual em todas as simulações; na eficiência dos equipamentos interiores, PP 2.5, consubstanciado na variação da carga interna associada por pessoa de 300 W para 600 W; na eficiência do sistema de iluminação, PP 2.6, para a qual se assumiu que os balastros seriam alterados para balastros electrónicos, mantendo-se a iluminação fluorescente; e, finalmente, no parâmetro PP 2.7, em que se considerou a variação do caudal de ar novo de 10 l/(sps) para 20 l/(sps).

Ao aumento da carga interna está associada uma redução das necessidades de aquecimento e, ao invés, um aumento das necessidades de arrefecimento. Este efeito ocorre em sentido contrário com a introdução de balastros electrónicos, desde que as luminárias estejam no ambiente climatizado. Finalmente, o aumento do caudal de ar novo terá como consequência o aumento da energia associada à ventilação. No entanto, como a temperatura do ar exterior é geralmente inferior à temperatura do ar interior, existe um potencial de arrefecimento gratuito que pode ser aproveitado. A possibilidade de aproveitamento deste potencial depende da tipologia do sistema de climatização.

No quadro seguinte são resumidas as alterações das características de cada elemento físico, sendo quantificados os factores alterados e a sua variação:

Parâmetro	Alteração física	Parâmetro físico	Valor de referência	Valor testado	Variação (%)
PP 2.1	Massa	Massa [kg/m ²]	155	204	32
PP 2.2	Isolamento	Condutibilidade térmica dos materiais [W/(m ² ·°C)]	1,53	0,57	-62
PP 2.3	Vidro exterior cinza	Transmissividade no visível	0,70	0,37	-47
PP 2.5	Equipamento eléctrico	Carga por pessoa [W/ps]	300	600	100
PP 2.6	Balastro electrónico	Energia eléctrica na iluminação [W/m ²]	17,5	14,8	-14
PP 2.7	Caudal de ar novo	Caudal de ar novo [l/(sps)]	10	20	100

Quadro 6.1. Variação dos parâmetros físicos

6.5 Os Edifícios Simulados

Simulou-se um piso de cada um dos três edifícios de escritórios considerados, utilizando o clima médio de Lisboa. O primeiro tem cerca de 800 m², com zonas interiores e periféricas, integrado num laboratório industrial. O segundo, incluído num complexo de processamento de refeições, tem sobretudo zonas periféricas com a maioria dos gabinetes orientados a sul. O terceiro faz parte de um edifício de escritórios, onde funciona uma redacção de um jornal. Como consequência, tem carga interna mais elevada e um período de funcionamento mais alargado do que os outros. Enquanto os primeiros funcionam sensivelmente entre as 9h e as 18h, o piso de redacção funciona entre as 9h e as 2h do dia seguinte.

No quadro seguinte, apresenta-se algumas das características geométricas dos edifícios, no que respeita a área bruta, área da envolvente exterior e área equivalente de envidraçados com orientação a sul. Na área da envolvente exterior inclui-se a área dos envidraçados. Obteve-se a área equivalente de envidraçados a sul usando a ponderação definida no RCCTE, que pondera com 1,0 a orientação a sul e com 0,7 as orientações a sudeste e a sudoeste. As restantes orientações têm peso nulo.

A envolvente exterior varia entre 41% e 47% da área bruta interior. O segundo edifício tem uma área de envidraçados a sul de cerca de 25% da área bruta de pavimento, ao contrário dos outros dois, onde a área de envidraçados equivalente a sul é de 1 ou 2%.

No quadro seguinte, resume-se a descrição das áreas dos três pisos dos edifícios referidos:

Áreas dos pisos	Edifício 1	Edifício 2	Edifício 3
Área bruta pavimento [m ²]	777	2000	2296
Área envolvente exterior [m ²]	367	821	934
Área equivalente de envidraçados a sul [m ²]	14	492	12
Área envolvente exterior por área bruta de pavimento	47%	41%	41%
Área equivalente de envidraçados a sul por área bruta pavimento	2%	25%	1%

Quadro 6.2. Áreas dos pisos em estudo

Assumiu-se em todos os edifícios, como situação base, um caudal de ar novo por pessoa de 10 l/s, uma potência de equipamentos utilizados por cada pessoa de 300 W e uma potência de 17,5 W/m² para a iluminação fluorescente.

A carga real de equipamentos no edifício 3 é superior, mas para efeitos de variação paramétrica foi mantido o valor de 300 W/ps. A variação deste parâmetro, nos outros dois

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

edifícios, indica o aumento de consumo de energia caso haja um aumento da carga interna; no edifício 3 a leitura deverá efectuar-se no sentido de saber qual a poupança que ocorreria se fosse possível reduzir o consumo dos equipamentos eléctricos.

O quadro seguinte resume as cargas de iluminação e de equipamentos que foram usadas na simulação de referência de cada um dos edifícios.

Utilização dos pisos	Edifício 1	Edifício 2	Edifício 3
Número de pessoas	57	202	347
Caudal de ar novo [m ³ /h]	2.052	7.272	12.492
Iluminação [W]	13.598	35.009	40.184
Outros equipamentos eléctricos [W]	17.100	60.600	104.100
Área bruta por pessoa [m ² /ps]	13,6	9,9	6,6
Iluminação por pessoa [W/ps]	239	173	116

Quadro 6.3. Equipamentos nos exemplos em estudo

6.6 Modelação dos Edifícios

Tal como referido, foi utilizado um modelo simplificado do sistema de climatização designado por Purchased Air. Este modelo considera que em cada espaço é insuflado o caudal de ar exterior, misturado com o caudal de ar arrefecido ou aquecido que for necessário, de modo a garantir uma temperatura no interior na gama de conforto. O modelo Purchased Air contabiliza a energia de aquecimento e de arrefecimento, usando um caudal insuflado a uma temperatura constante, sendo de 14 °C para o modo de arrefecimento e de 40 °C para o modo de aquecimento. Assumiu-se ainda uma banda morta na temperatura interior de conforto entre 20 °C e 24 °C, de modo a que o sistema de climatização entre em modo de arrefecimento quando a temperatura interior exceder os 24 °C e, quando se reduzir a valores inferiores aos 20 °C, funcione em modo de aquecimento.

Considerou-se ainda uma UTA hipotética com uma perda de pressão de 800 Pa e com o rendimento de 60% no conjunto moto-ventilador. Estes dados serviram para calcular a energia consumida na ventilação e integraram o processo psicrométrico de tratamento do ar. As condições anteriormente definidas não são exactamente as que ocorrem nos sistemas de climatização prescritos para cada edifício, mas utilizando o mesmo tipo de sistema na modelação pode comparar-se o consumo de energia provocado pela variação dos parâmetros.

O modelo Purchased Air permite definir diagramas de utilização para a generalidade das variáveis usadas. Considerou-se que o caudal de ar novo é variável ao longo do dia, com um perfil igual ao utilizado para a ocupação de cada zona. Em termos de ocupação,

assumiu-se que os ocupantes teriam um metabolismo de 1,2 met e usariam vestuário conducente a 0,5 clo nos meses de Março a Outubro e de 1,0 clo de Novembro a Fevereiro.

O sistema de iluminação seria regulável em patamares de iluminação em função da luz do dia. A iluminação pode estar desligada, a meia carga ou à carga total, com patamares definidos por um sensor orientado para as janelas. Este está localizado no centro de cada sala a 0,8 m acima do solo, actuando de modo a garantir a iluminação, mas evitando o encadeamento. A iluminação considerada é fluorescente, com 36% de energia libertada por radiação e 22% na banda visível.

Cada edifício foi simulado com quatro sub intervalos de integração por hora, obtendo-se as necessidades de aquecimento, de arrefecimento, a energia consumida na ventilação e as energias consumidas na iluminação e nos equipamentos.

Externamente os dados resultantes foram pós-processados de modo a calcular a energia eléctrica consumida que supra as necessidades de arrefecimento e de aquecimento. Para o efeito, assumiu-se que se utilizariam máquinas frigoríficas água-ar com accionamento eléctrico. Os restantes equipamentos consumidores de energia foram considerados de consumo desprezável ou com consumo constante nas hipóteses de simulação de cada edifício.

São exemplos desta última situação a energia de bombagem de água ou fluido térmico, a quantificação da energia de ventilação em função do sistema de climatização utilizado, a energia consumida nas unidades terminais ou a variação do consumo das máquinas frigoríficas a cargas parciais. Estes consumos serão avaliados na abordagem seguinte ao sistema de climatização, descrita a partir da secção 6.8.

Os resultados obtidos da simulação dos três edifícios são em sentido estrito apenas aplicáveis aos edifícios em estudo. No entanto, a identificação dos processos físicos inerentes à variação de cada parâmetro permite tomar os resultados obtidos como representativos do comportamento de edifícios semelhantes.

6.7 Resultados da Modelação dos Edifícios

Pós processando as necessidades de aquecimento e de arrefecimento, obteve-se o consumo de energia eléctrica nas máquinas frigoríficas e as potências máximas de aquecimento e de arrefecimento do edifício. O perfil de consumo em equipamentos eléctricos foi mantido para cada edifício em todas as simulações. Obteve-se ainda a energia consumida na iluminação e a energia consumida na ventilação.

Nas diversas simulações realizadas, os parâmetros variam a partir dos valores de referência indicados no Quadro 6.1. Os resultados obtidos nesta situação são expressos no Quadro 6.4, sendo a Electricidade anual a soma das parcelas relativas ao consumo de electricidade para iluminação, equipamentos eléctricos, climatização e ventilação.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

	Edifício 1		Edifício 2		Edifício 3	
	Total	Por m ²	Total	Por m ²	Total	Por m ²
Necessidades de aquecimento anuais [kW·h]	515	0,66	2.282	1,14	0,07	0
Necessidades de arrefecimento anuais [kW·h]	35.229	45	157.733	79	572.730	249
Potência de aquecimento [kW]	10	0,13	43	0,22	32	0
Potência de arrefecimento [kW]	39	0,50	156	0,78	286	1,25
Electricidade anual (1+2+3+4) [kW·h]	95.364	123	240.768	120	921.749	401
1- Electricidade anual para climatização [kW·h]	9.516	12	42.625	21	150.494	66
2- Electricidade anual para iluminação [kW·h]	39.122	50	31.741	16	253.617	110
3- Electricidade anual para ventilação [kW·h]	1.838	2	7.327	4	22.122	10
4- Electricidade anual para equipamentos [kW·h]	44.888	58	159.075	80	495.516	216

Quadro 6.4. Resultados da simulação para os edifícios na situação de referência

Comparando as simulações base dos três edifícios, podem alcançar-se algumas conclusões: Os equipamentos eléctricos e a iluminação são os principais consumidores de energia no edifício; as necessidades de aquecimento em todos os edifícios são significativamente menores do que as necessidades de arrefecimento, sendo nulas no edifício com elevada carga interna; o edifício com maior área de envidraçados a sul tem potência e necessidades de aquecimento e arrefecimento por unidade de área maiores do que o edifício tomado como tipo. No entanto, desde que haja controlo do fluxo de iluminação, o consumo de electricidade em iluminação por unidade de área no edifício 2 é de cerca de um terço do consumo no edifício 1.

Efectuando as variações paramétricas referidas relativamente à construção do edifício e à sua utilização, obteve-se os resultados expressos no Quadro 6.5. Face aos parâmetros considerados na análise é de salientar que a redução do consumo de energia depende sobretudo da utilização de equipamento e de iluminação mais eficientes. O aumento da massa num edifício (PP 2.1) contribui com uma redução no consumo de energia inferior a 0,5%. Pelo contrário, aumentando o isolamento do edifício (PP 2.2) o consumo aumenta em até 0,5%.

Muito embora estes valores estejam dentro da margem de erro de qualquer cálculo, é importante notar que tendo estes edifícios inércia média ou forte, o aumento da massa terá sempre um impacto reduzido; por outro lado, sendo a carga interna elevada, o aumento do isolamento reduz a libertação de calor para o exterior e, conseqüentemente, aumenta o consumo em arrefecimento.

	Electricidade anual [kW·h]		
	Edifício 1	Edifício 2	Edifício 3
Situação de referência	95.534	240.768	921.749
Parâmetro sujeito a alteração	Variação em percentagem da Electricidade anual, relativamente à situação de referência		
PP 2.1.	-0,1	-0,3	0,0
PP 2.2.	+0,2	+0,1	+0,5
PP 2.3.	+6,5	+9,4	+0,1
PP 2.5	+54,9	+78,7	+66,4
PP 2.6.	-7,4	-2,3	-5,2
PP 2.7.	+1,3	+2,3	+0,3

Quadro 6.5. Variações dos parâmetros nos edifícios

Outro aspecto interessante prende-se com a alteração dos envidraçados. Ao reduzir-se a sua fracção solar (PP 2.3.), a carga por radiação reduz-se, mas as necessidades de iluminação aumentam. Para satisfazer estas necessidades, há que aumentar mais que proporcionalmente o consumo em iluminação, dado que as lâmpadas existentes têm uma fracção de radiação na gama visível inferior à luz solar. Em consequência, há um aumento do consumo de energia.

A variação de energia mais significativa é obtida com a variação das cargas internas (PP 2.5.). Estas, além de utilizarem energia eléctrica para funcionarem, obrigam a consumir energia no sistema de climatização para a remover.

A melhoria da eficiência da iluminação (PP 2.6) tem o efeito recíproco, havendo portanto uma melhoria no consumo mais que proporcional.

Finalmente, há que salientar o fraco aumento do consumo de energia com a duplicação do caudal de ar novo (PP 2.7). Esta situação ocorre desde que haja possibilidade de utilizar o arrefecimento gratuito. No entanto, na generalidade das instalações de climatização o ar novo é tratado numa UTAN para uma condição média interior de temperatura e humidade, pelo que o edifício não beneficia do arrefecimento gratuito. Em diversos períodos, o ar é aquecido na UTAN para posteriormente ser arrefecido. O consumo de energia desta opção é expresso na secção 6.11, em que é utilizado um sistema análogo ao que é neste momento descrito.

6.8 Sistema de Climatização

Após a avaliação do impacto do edifício no consumo de energia, analise-se agora o sistema de climatização, objecto principal deste trabalho. Para o efeito, considere-se o primeiro edifício mencionado tal como foi projectado, do qual se analisou apenas o seu piso de escritórios, encarado a seguir como situação de referência.

A eficiência do seu sistema de AVAC, parâmetro PP 2.10, é agora analisada por variação dos respectivos parâmetros folha aplicáveis ao projecto em questão. Assume-se, no presente caso, que há independência destes parâmetros relativamente a quaisquer outros relacionados com o consumo de energia no edifício, externos à decomposição de PP 2.10.

O edifício em estudo integra um laboratório farmacêutico e um piso de escritórios. O laboratório em causa possui controlo de temperatura e do número de partículas, correspondendo à classe 8 da ISO 14644-1. Para o piso de escritórios é apenas exigido conforto térmico e adequada qualidade do ar. Para efeitos da simulação energética, o piso foi dividido em cinco zonas, para as quais se obtiveram as cargas horárias ao longo do ano utilizando o Energy Plus.

A potência total de arrefecimento instalada no laboratório e piso de escritórios é de 180 kW. Esta potência é fornecida por um GPFC só frio de 120 kW, coadjuvado em modo de arrefecimento por uma bomba de calor de 60 kW. As necessidades de aquecimento são supridas apenas pela bomba de calor. Ambos os equipamentos utilizam o R407-c como fluido refrigerante e têm compressores do tipo *scroll*. Estes equipamentos fornecem água fria a 7 °C com retorno a 12 °C no circuito de arrefecimento e 45 °C com retorno a 40 °C no circuito de aquecimento.

As bombas de circulação do circuito primário de aquecimento e de arrefecimento são de caudal constante e qualquer uma tem de vencer 60 kPa de perda de carga.

O piso de escritórios é climatizado utilizando-se uma UTAN e ventiloconvectores do tipo cassette. A UTAN é uma unidade de duplo piso com recuperador de placas, bateria de arrefecimento e de aquecimento. Dispõe ainda de pré-filtro G3 na admissão do ar do exterior e no retorno à UTAN e de filtro F7 antes da secção das baterias. Os ventiladores têm pás avançadas seleccionados em condições nominais com um rendimento de 67%. No circuito de insuflação, o ventilador movimenta 2.150 m³/h, tendo de vencer 760 Pa de pressão total, dos quais 150 Pa são relativos à perda de carga na rede de condutas; na rede de exaustão o ventilador tem de movimentar 1.600 m³/h contra 335 Pa de pressão total, dos quais 100 Pa são referentes à rede de condutas. Os caudais de insuflação e de exaustão são constantes. A perda de carga no recuperador para os caudais indicados é de 200 Pa no circuito de insuflação e de 180 Pa no circuito de exaustão. A unidade deve insuflar o ar novo

a uma temperatura de 22 °C, intermédia da banda morta de controlo, de modo a não interferir significativamente nas condições interiores. Deste modo, desacopla-se o tratamento do ar novo das cargas internas.

As redes de água fria e de água quente servem esta UTAN e outras três unidades de tratamento de ar que estão associadas ao processo. Estas redes têm electro-bombas com motores de etiqueta EFF2 de caudal constante para ambas as redes de água fria e de água quente. Qualquer das electro-bombas tem um caudal de 4,2 l/s, a primeira bombeando-o contra 48 kPa e a outra contra 68 kPa.

No interior do piso de escritórios, os VC removem a carga interna, necessitando de uma potência de 2 kW no conjunto de todos os motores.

As respectivas electro-bombas de circulação movimentam 2,7 l/s de água arrefecida contra 58 kPa; e 1,1 l/s de água quente, vencendo uma perda de carga de 56 kPa. Estas bombas são igualmente accionadas por motores eléctricos com classificação eléctrica EFF2.

Finalmente, existe ainda um pequeno ventilador de exaustão nas casas de banho.

Na avaliação que em seguida se fará considera-se a hipótese de o sistema do piso de escritórios e do laboratório terem comportamentos análogos a cargas parciais. Esta hipótese permite considerar, em cada momento, que todos os equipamentos estão à mesma percentagem da sua carga máxima. Este pressuposto permite ainda usar os resultados obtidos em edifícios que difiram do presente por um factor de escala.

6.9 Parâmetros do Sistema de Climatização

Avaliou-se a importância relativa dos parâmetros do sistema de climatização, variando os parâmetros referentes aos níveis de decomposição 4 ou 5, apresentados na Figura 5.5. Alguns destes parâmetros não têm aplicação no presente sistema de climatização. É o caso dos parâmetros de projecto relativos ao sistema de arrefecimento gratuito, PP 4.4, dado que a UTAN tem de insuflar o ar permanentemente a 22 °C; ao PP 4.8, selecção da caldeira, uma vez que o sistema utiliza uma bomba de calor; e ao PP 5.7, pressão e temperatura de condensação do GPFC, já que, ao utilizar ar exterior para remoção do calor de condensação, a máquina frigorífica tem a temperatura de condensação dependente da temperatura exterior.

Existem outros parâmetros que fazem parte do projecto do sistema mas que, para efeitos da avaliação energética, podem ser considerados com um único estado. Pertence a este grupo o parâmetro PP 5.2, relativo ao controlo local do caudal de água nas unidades. Situação análoga ocorre com o parâmetro PP 5.5, controlo local do caudal de ar, que dependerá da existência de um sistema de caudal de ar variável.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Finalmente, num sistema com uma UTAN, o ajuste do caudal de ar novo, RF 5.3, e o ajuste do caudal de insuflação, RF 5.4, são a mesma função. Utilizar-se-á para o efeito o parâmetro PP 5.3.

Existem ainda parâmetros cujo nível de decomposição teria de ser detalhado para ser aplicável a este exemplo. O parâmetro PP 5.1, sistema moto-bomba de caudal variável, deverá conter um variador da velocidade de rotação do motor e um controlador dessa velocidade. É comum o sistema de controlo da velocidade do motor usar um sensor de pressão num ponto da tubagem que informa o variador de velocidade do motor, de modo a manter uma pressão pré-determinada e constante nesse ponto. Em alternativa, este sistema pode funcionar com base na estimativa do caudal necessário na rede.

Uma situação semelhante ocorre com o parâmetro PP 5.3., “sistema de modulação do ar novo”. Para além da variação da velocidade do motor, é necessário existir um parâmetro de controlo, o qual pode, mais uma vez, ser a pressão num ponto da conduta. Em alternativa, pode obter-se uma estimativa do ponto de funcionamento do ventilador a partir do conhecimento das necessidades de ar novo no edifício. Estas podem ser calculadas pela soma dos caudais insuflados em cada espaço, os quais dependem da poluição interior. A medição do caudal em cada espaço por ser tomada por um dispositivo de medição ou estimada pelo conhecimento da posição do registo que o controla.

Finalmente, o parâmetro PP 4.9, “perda de carga em cada circuito” deve ser decomposto na perda de carga definida para a rede de ar e para os circuitos das redes de água fria e quente. Já o parâmetro PP 4.10, “temperaturas de aquecimento e de arrefecimento nos circuitos”, apenas é aplicável às redes de água. Na rede de ar, pretende-se uma temperatura de insuflação do ar novo constante, de modo a não interferir na carga térmica interna. O parâmetro referido será subdividido em temperatura do circuito e diferença de temperaturas entre o fluxo de ida e de retorno. O primeiro é dependente de PP 5.8.

No Quadro 6.6 resume-se as indicações anteriores e indica-se os estados analisados, bem como as variáveis utilizadas no programa de avaliação do consumo de energia. De um modo geral, usou-se dois estados para cada parâmetro [6.4]: um referenciado por -1, normalmente associado a uma solução mais consumidora de energia, e outro, designado por +1, associado a uma solução melhor em termos de redução do consumo de energia.

Os parâmetros apresentados pressupõem as seguintes hipóteses:

Na UTAN será considerada a possibilidade de dispor de um recuperador (PP 4.3) com rendimento de 50% nas trocas de calor sensível.

O GPFC, que utiliza o R407-c como gás refrigerante, poderá ter recuperação parcial ou total. Na primeira hipótese, é possível recuperar em calor, cerca de 16% da energia removida em modo de arrefecimento. Em recuperação total, o calor equivale ao que seria libertado no condensador nas condições de funcionamento da máquina. As duas hipóteses referidas constituem os estados para o parâmetro PP 4.5, às quais acresce a possibilidade

de utilização de um GPFC sem recuperação, obrigando a usar uma bomba de calor para a produção de todo o calor necessário.

As classificações dos motores (PP 4.6) consideradas foram a mais comum EFF2, ou, em alternativa, a solução mais eficiente, EFF1.

A eficiência, EER, do GPFC (PP 5.6) foi assumida como metade da eficiência de Carnot, quer em modo de aquecimento, quer em modo de arrefecimento. Este valor está, em média, de acordo com os EER dos equipamentos de uma marca de referência, quando determinados às temperaturas exteriores correspondentes. Para o efeito considera-se os valores típicos de temperatura no condensador e no evaporador: em modo de arrefecimento, a temperatura do evaporador será 5 °C inferior à temperatura de saída da água e o condensador em média 16 °C acima da temperatura exterior; em modo de aquecimento, o condensador estará em média a 55 °C e o evaporador a uma diferença de 10 °C da temperatura exterior. Caso a temperatura exterior seja baixa e haja necessidade de arrefecimento, supõe-se a existência de controlo de condensação, evitando-se assim que a temperatura de condensação se reduza abaixo de 36 °C. Não foram consideradas as situações de paragem do equipamento, em modo de aquecimento, por via de entrada das máquinas em ciclo de descongelamento.

Parâmetro folha	Nome (abreviado)	Nome e abreviatura da variável	Estados
PP 5.1	Sistema moto-bomba caudal variável	Caudal variável (cvb) Controlo caudal (qcb)	-1: fixo +1: variável -1: pressão +1: caudal
PP 5.3	Sistema modulação de ar novo	Caudal variável (cvv) Controlo caudal (qcv)	-1: fixo +1: variável -1: pressão +1: caudal
PP 4.3	Recuperador de calor na UTA	Recuperador na UTAN (rc)	-1: sem recuperador +1: com recuperador
PP 4.5	Recuperador no GPFC	Recuperador no GPFC (rch)	-1: sem recuperador -0,6: parcial +1: total
PP 4.6	Classificação EFF de motores	Classe EFF (eff)	-1: classe EFF2 +1: classe EFF1
PP 5.6	GPFC com elevado ESEER e EER	Eficiência do GPFC (eer)	-1: pior ESEER +1: melhor EREER
PP 5.8	P e T de evaporação	Temperatura no evaporador (tev)	-1: normal +1: mais elevada
PP 5.9	Controlo de carga no GPFC	Carga parcial no GPFC (ccpch)	-1: <i>scroll</i> +1: parafuso
PP 4.9	Perda de carga de cada circuito	ΔP água (dpmb) ΔP ar (dpmv)	-1: normal +1: menor -1: normal +1: menor
PP 4.10	Temperatura de aquecimento e de arrefecimento dos circuitos	Temperatura no circuito de água (tev) Diferença de temperaturas (dtM)	-1: normal +1: mais elevada -1: normal +1: mais elevada
PP 4.11	Tipo de isolamento	Isolamento (isl)	-1: normal +1: mais isolada
PP 4.12	Classe de fugas	Classe de fugas (clf)	-1: menos estanque +1: mais estanque

Quadro 6.6. Estados dos parâmetros no sistema de climatização

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Para a variável tev , que interfere com o parâmetro PP 5.8 e PP 4.10 assumiu-se os estados correspondentes a uma temperatura de saída da água do GPFC de 7 °C ou de 10 °C. Para o parâmetro PP 5.9. assumiu-se dois perfis de consumo de um GPFC a carga parcial. Um baseado nos consumos a carga parcial de uma máquina com quatro compressores *scroll*, outro com os dados do consumo de uma máquina com um compressor de parafuso de três etapas de funcionamento. Em ambos os casos estimou-se o consumo a cargas intermédias das etapas conhecidas por aplicação de um factor de degradação da eficiência em conformidade com a norma ARI 550/590 [6.5]. Obteve-se assim um multiplicador do EER, aferido às condições de 7 °C para temperatura de saída da água e de 35 °C para a temperatura exterior. Os valores do EER a carga parcial foram aproximados por um polinómio de grau três. Assumiu-se que este multiplicador seria aplicável quando o EER variasse, em função das temperaturas de evaporação e de condensação.

O estado normal do parâmetro PP 4.9 para os circuitos de água e de ar corresponde às perdas de carga indicadas na secção 6.8. O estado de menor perda de carga corresponde a uma redução de 10 kPa em qualquer dos circuitos de água, quando à carga máxima. Esta redução pode, por exemplo, ser obtida por nova selecção dos permutadores da UTAN e dos VC.

Para o circuito da rede de ar, assumiu-se que a redução de perda de pressão ocorreria por redimensionamento da UTAN, usando-se uma velocidade de passagem menor.

Foi utilizada a diferença de temperaturas (dtM) de 5 °C no estado normal e de 10 °C na mais elevada. Não foram considerados os efeitos relativos à remoção do calor latente de um sistema que funcionasse com as variáveis tev e dtM nos estados +1.

Para o tipo de isolamento (PP 4.11) considerou-se o isolamento de 20 mm prescrito no projecto como estado normal e de 30 mm como estado de maior isolamento. O primeiro caso concorda genericamente com a prescrição do RSECE para os diâmetros utilizados. Para calcular a energia transferida, admitiu-se um coeficiente de troca de calor por grau de diferença de temperatura entre o fluido no interior da tubagem e a temperatura exterior à tubagem e por unidade de comprimento de tubagem, constante para cada diâmetro, usando uma condutividade linear do isolamento de 0,035 W/(m·K) [6.6]. No caso de tubagens no exterior do edifício, foi considerada a temperatura exterior; para as tubagens no interior do edifício foi considerada a temperatura média das diversas zonas. Admitiu-se ainda que metade do comprimento da tubagem se encontrava à temperatura de ida e a outra metade à temperatura de retorno, em qualquer dos modos de aquecimento ou de arrefecimento.

Finalmente para a classe de fugas das condutas (PP 4.12) assumiu-se a classe A para a classe de fugas na situação de menor estanquidade, própria para pressões até 500 Pa; para a situação com maior estanquidade escolheu-se a classe B, apropriada para 1.000 Pa. As fugas foram estimadas pela aplicação da NP EN 12237 [6.7] para uma pressão média de 75 Pa.

6.10 Modelação do Sistema de Climatização

O modelo construído utiliza os dados horários, zona a zona, anteriormente referidos. Estes dados são lidos pelo programa `dadosin.m`, que agrega os dados das diversas zonas em dados do edifício. Posteriormente, gera as variáveis horárias relativas à temperatura e entalpia exteriores, número de pessoas, cargas internas de aquecimento e cargas internas de arrefecimento sensível e total. Estas variáveis permanecem no *workspace* do MatLab, sendo utilizadas pelo programa de avaliação do consumo de energia do sistema de climatização `ProcessE.m`.

O programa `Gerador.m` gera todas as 49.152 combinações dos estados das quinze variáveis, das quais catorze têm dois estados possíveis. A variável relativa à recuperação de calor do GPFC tem três estados. Para cada combinação é chamado o `ProcessE.m`, que calcula o consumo de energia nos diversos equipamentos do sistema de climatização. São eles a UTAN, as bombas de circulação de água fria e quente dos circuitos primários e secundários, as máquinas frigoríficas, os ventiloconvectores e o ventilador de exaustão. No caso de existir recuperação no GPFC, considera-se ainda a bomba de circulação respectiva.

Para cada combinação são pré-dimensionados os diversos componentes do sistema de climatização, em função das cargas térmicas e condições de operação.

O fluxo de processamento realizado é apresentado de modo esquemático na Figura 6.1.

Face às baixas cargas de aquecimento deste tipo de edifícios, assumiu-se que o sistema de aquecimento funcionaria ininterruptamente de 1 de Novembro a 31 de Março e nos restantes meses apenas nos períodos matinais em que fosse necessário aquecimento.

O programa começa por calcular a energia consumida nos ventiladores da UTAN no programa `EVentilador.m`. Utilizando o rendimento conjunto dos sistemas moto-ventiladores, calcula-se o acréscimo na temperatura do fluxo de ar. Este acréscimo faz variar ligeiramente as cargas do ar novo retiradas na UTAN. Estas são a seguir determinadas no programa `Utan.m`, para condições fixas de insuflação de 22 °C e 50% de humidade relativa. Este programa considera a possibilidade de a UTAN poder ter recuperador e caudal variável, usando como controlo as variáveis *rc* e *cvv*. Dado que se assume que o ar novo é insuflado nas condições referidas, em algumas horas haverá uma ligeira carga de aquecimento, ou de arrefecimento, carga esta que é introduzida nos espaços. A correcção à carga térmica de cada zona é efectuada no programa `Correcção.m`.

Há ainda a considerar a energia que é dissipada por convecção nas tubagens, calculada em `ETubagem.m`. Esta energia é somada à carga de aquecimento e de arrefecimento suportada pelo sistema. Foram tomados em consideração neste programa os períodos de funcionamento da rede de aquecimento e as temperaturas interiores da tubagem em função dos parâmetros *tev* e *dTM*. Nas cargas dissipadas nas tubagens são determinantes as

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

trocas de calor nos tubos de menor diâmetro comercial utilizado, quer porque representam cerca 2/3 do comprimento total da tubagem, quer porque a relação entre as trocas de calor e a energia transportada é maior.

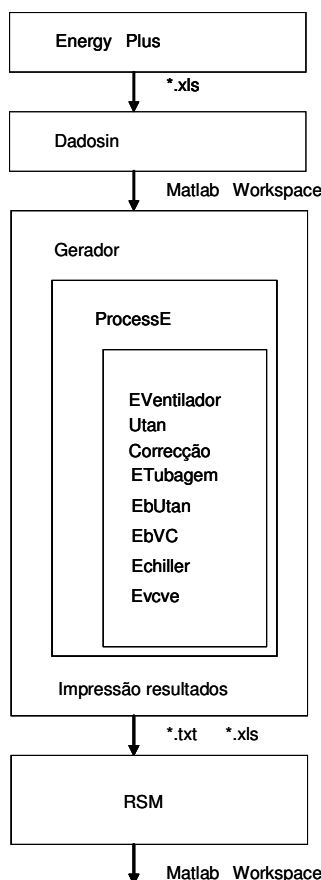


Figura 6.1. Processamento

O ajustamento é realizado por mínimos quadrados, calculando-se os coeficientes da hiper-superfície que permitem relacionar as variáveis. Estes relacionamentos são expressos na forma de uma matriz (15x15).

Descreve-se de seguida, com mais pormenor, os programas de cálculo de consumo de energia dos diversos componentes do sistema.

O programa `EVentilador.m` utiliza as variáveis de controlo relativas à possibilidade de utilização de caudal variável, de controlo do caudal, de uso de recuperador na UTAN, da classe EFF dos motores, da perda de carga no circuito de ar e da classe de fugas da rede aerífera. O programa pré-dimensiona os ventiladores, usando o caudal e a perda de carga a vencer. A cada hora é determinada a percentagem de carga do motor em função da energia entregue ao fluido. O consumo horário do motor é calculado afectando a energia referida dos rendimentos dos diversos componentes intervenientes. Para o efeito, determina-se o rendimento da roda do ventilador, de pás avançadas, em modo de controlo por pressão e em modo de controlo por caudal. No primeiro caso, o rendimento varia entre 47% e 59%

quando a carga varia de 50% para 100%; no segundo caso, o rendimento é quase constante e igual a 59%. Utilizou-se ainda os rendimentos mínimos definidos para as classes de motores EFF1 e EFF2, para potências entre 1,1 kW e 3 kW; assume-se uma redução de 5% no rendimento do motor com a variação da carga para 50%; um rendimento de 95%, constante, para a correia do ventilador; e, para o controlador de velocidade usa-se o rendimento de 95%, que decai para 80% quando a carga se reduz de 100% para 70%.

Interpolou-se os valores dos rendimentos referidos com polinómios de diversos graus, sendo a energia consumida no motor obtida da energia necessária à movimentação do fluido em cada hora, afectada dos diversos rendimentos obtidos da carga do motor. A diferença entre as duas determina uma carga sensível introduzida pelo ventilador.

A energia para a movimentação do fluido depende da perda de carga e do caudal a movimentar. Assim, as perdas de carga referidas na secção 6.6 foram recalculadas em função da existência de recuperador (variável rc), de perdas de carga menores relativamente à situação de projecto ($dpmv$) e da classe de fugas (clf) das condutas. No caso de o sistema não contemplar recuperador, reduz-se as perdas de carga dos valores correspondentes; para o caso da variável $dpmv$, reduz-se ainda as perdas de carga proporcionalmente ao quadrado da velocidade facial do ar na bateria da UTAN, quando se utiliza a secção comercial imediatamente superior, ao que corresponde reduzir a velocidade de 2,96 m/s para 2,43 m/s; para a classe de fugas (clf) menos estanque, assume-se um aumento de 90 m³/h no caudal dos dois ventiladores. Para a situação de caudal variável (cvv), considera-se o caudal necessário em função do número de pessoas presente nos espaços. Quando o controlo do caudal (qcv) é realizado mantendo a pressão num ponto da conduta, a energia varia directamente consoante o caudal; para o caso em que o controlador permite que o ponto de funcionamento siga a linha da instalação, a energia é tomada proporcionalmente à potência 2,8 do caudal. Assume-se que o caudal nunca se reduziria a menos de 30% do caudal de projecto. Usaram-se as dimensões das redes aerífera e hidráulica dimensionadas no projecto em todas as simulações do consumo de energia nos ventiladores e nas bombas. De acordo com o que é comum definir na maioria dos sistemas, tomou-se as condições psicrométricas interiores para efeitos dos cálculos dos consumos nas baterias da UTAN em modo de aquecimento e de arrefecimento, mas não se consideraram as eventuais necessidades de humificação.

Os programas de cálculo da energia consumida nas bombas, EbUtan.m e EbVC.m, seguem uma estrutura semelhante. São utilizados nestes programas as variáveis relativas à utilização de caudal variável (cvb), tipo de controlo do caudal (qcb), perda de carga menor na rede (dpm), classe de motores (eff) e diferença de temperatura (dtM).

Nestes dois programas, o rendimento da roda das bombas varia, no caso de controlo por pressão, entre 40% e 67% quando o caudal varia de 25% a 100%; no caso de controlo por caudal, varia entre 30% e 67% para os mesmos limites de variação de caudal. Utiliza-se

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

igualmente polinómios interpoladores para determinar os rendimentos do motor, do controlador e da carga parcial dos motores. Para o caso de uma diferença de temperatura (dtM) mais elevada entre a entrada e a saída, corrige-se o caudal e a perda de pressão. Toma-se o valor da perda de carga, para a situação de controlo por caudal, como sendo proporcional à potência 1,75 do caudal, pelo que a energia depende da potência 2,75 do caudal.

O programa Echiller.m estima a energia consumida nas máquinas frigoríficas. Neste programa usa-se os estados e considerandos referidos na secção 6.9. Nesse sentido, admite-se a possibilidade de variar a temperatura no circuito de arrefecimento (tev), de variar o EER da máquina (eer), de a máquina poder ter recuperação parcial ou total de calor (rch) e de o controlo da carga parcial ser análogo a uma máquina com compressores *scroll* ou de parafuso (rcpch). O EER é determinado em função das temperaturas impostas para o evaporador e condensador. Quando a máquina funciona sem recuperação ou com recuperação parcial impõe-se a necessidade de a temperatura do condensador ser dependente da temperatura exterior e a do evaporador, dependente da temperatura do circuito de água fria. Em modo de recuperação total, o cálculo do EER da máquina considera a temperatura do condensador em função da temperatura da rede de água quente. Para efeitos da estimativa do consumo nas bombas, assume-se o funcionamento em permanência da bomba do circuito primário de arrefecimento. A bomba do circuito primário de aquecimento funciona apenas nos períodos de aquecimento referidos. Em modo de recuperação parcial, existirá ainda uma bomba suplementar com o caudal necessário à recuperação referida e com uma perda de carga a vencer de 30 kPa; em modo de recuperação total existirá outra bomba, com o caudal compatível com a recuperação total, que funcionará em permanência nos períodos referidos de aquecimento contra uma perda de carga de 60 kPa.

O programa Evcve.m determina a energia consumida nos ventiloconvectores e no ventilador de exaustão. Este programa pré-dimensiona o número de ventiloconvectores em função da carga de arrefecimento e das variáveis relativas à temperatura nos circuitos tev e dTM. Utiliza para o efeito os dados de potências de ventiloconvectores em função das temperaturas de entrada e de saída da água refrigerada. Usando a energia específica dos VC determina-se o seu consumo. O programa calcula ainda o consumo no ventilador de exaustão, considerado com funcionamento constante.

Para o cálculo da energia consumida nas bombas do primário dos circuitos de aquecimento e de arrefecimento, admite-se que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do GPFC é constante e de 5 °C. Esta condição é a normalmente utilizada na maioria dos GPFCs. Determina-se ainda a energia consumida nas bombas dos circuitos de recuperação nos períodos de funcionamento do sistema de aquecimento.

6.11 Resultados da Modelação do Sistema de Climatização

Na secção 6.7 estimou-se o consumo de energia do edifício em 95.364 kW·h /ano, não contabilizando propositadamente diversos consumos no sistema de climatização, que seriam constantes nas hipóteses consideradas. Nesta secção, pretende avaliar-se o consumo do sistema de climatização, mantendo-se agora fixas as condições de funcionamento do edifício.

Utilizando os programas descritos na secção anterior, quantifica-se os consumos do sistema de climatização previsto em projecto, assim como os das diversas hipóteses combinatórias de parâmetros.

Na situação prevista em projecto, todas as variáveis de controlo estão no estado -1, excepto aquela que é relativa ao recuperador (rc), que será +1. Neste caso, o consumo global é de 107.941 kW·h /ano, dos quais 22,2% são relativos ao sistema de climatização. Para esta situação, a Figura seguinte ilustra os consumos nas diversas parcelas, agregando ainda os consumos nas bombas do circuito primário e secundário. A referência a GPFC inclui os consumos das máquinas frigoríficas, incluindo as bombas de calor. O consumo na UTAN refere-se ao consumo nos ventiladores de insuflação e de exaustão. Finalmente, em VC+VE agrega-se o consumo nos ventiloconvectores com o consumo do pequeno ventilador de extracção.

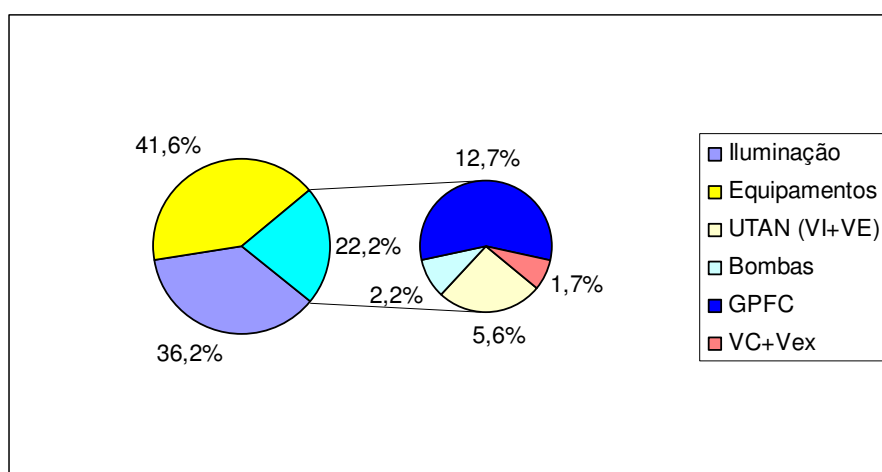


Figura 6.2. Consumos do edifício e do sistema de climatização

Neste caso, o consumo de energia eléctrica afecto ao sistema de climatização é de 23.931 kW·h por ano, necessário para remover uma carga em modo de arrefecimento de 58.300 kW·h e para introduzir a carga de 7.750 kW·h em modo de aquecimento. Para as potências máximas de arrefecimento de 53,6 kW e de aquecimento de 11 kW, as cargas referidas correspondem ao funcionamento à carga máxima durante cerca de 1.100 h em arrefecimento e de 700 h em aquecimento. Outro indicador interessante é referente ao

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

consumo total de energia eléctrica do sistema de climatização. Este consumo representa menos de metade da carga em modo de arrefecimento.

Na situação em estudo, a eficiência média das máquinas frigoríficas em modo de arrefecimento é de 4,9 e em modo de aquecimento de 4,2.

Considerando agora a geração de todas as hipóteses, pode obter-se as combinações a que corresponde o menor consumo de energia. Existem duas soluções, que diferem no parâmetro tev_1 , ou seja a utilização de temperatura da água de arrefecimento a 7 °C ou a 10 °C é indiferente para a obtenção da solução de menor consumo de energia. Esta solução ocorre quando a generalidade dos parâmetros de controlo do programa tomam o valor +1. Exceptuam-se os relativos à carga parcial do GPFC, à recuperação de calor no GPFC e ao dtM. Relativamente ao primeiro parâmetro, a solução de menor consumo de energia ocorre com uma máquina com compressores *scroll*, para o segundo quando é utilizada recuperação parcial e para o parâmetro dtM quando este é -1. Sendo este parâmetro referente ao aumento da diferença de temperatura entre a entrada e saída do GPFC, conclui-se que o seu aumento não é, neste caso, uma medida de eficiência energética. Esta aparente contradição, entre os resultados obtidos e a melhoria da eficiência do GPFC com o aumento de temperatura, é sobretudo explicada pelo aumento do consumo de energia para movimentação do caudal de ar nos ventiloconvectores.

Assim, o sistema com menor consumo de energia deverá contemplar a utilização de caudal variável nos ventiladores e nas bombas, de recuperador na UTAN, ter recuperação parcial no GPFC (com compressores *scroll*), utilizar motores de classe EFF1, utilizar indiferentemente a temperatura de ida de 7 °C ou de 10 °C com uma diferença entre a ida e o retorno de 5 °C, perdas de carga menores no circuito de ar, com isolamento de 30 mm nas tubagens e com condutas mais estanques de classe B. Neste caso, o consumo relativo ao sistema de climatização é de 16.470 kW·h.

Por outro lado, o sistema que consome mais energia utiliza 27.950 kW·h, ou seja, utiliza 70% mais que o sistema mais eficiente. O maior consumo ocorre quando todos os parâmetros estão no estado -1, excepto os relativos ao recuperador da UTAN, do recuperador do GPFC e do seu controlo de carga e da maior diferença de temperatura entre a entrada e a saída, que estarão no estado +1.

Ou seja, um sistema típico no mercado, que utilize recuperador de calor na UTAN, recuperador total no GPFC, com controlo de carga análogo à de um GPFC de parafuso e uma diferença de 10 °C entre a ida e retorno, é o sistema mais desfavorável em termos de consumo de energia. Esta solução é muitas vezes rotulada como energeticamente interessante. Ocorre, por esquecimento, que a utilização de um recuperador na UTAN acarreta uma perda de carga constante no circuito de insuflação e de exaustão e que, nos

períodos de recuperação total, a temperatura no condensador passa a ser determinada pela temperatura do circuito de água quente.

O recuperador de calor da UTAN tem, no entanto, um papel dúbio dado que surge quer na solução mais eficiente, quer na solução menos eficiente. Estas conclusões apontam para que haja algum cuidado na especificação de sistemas de recuperação. Existem vantagens energéticas na utilização do recuperador da UTAN se for utilizado caudal de ar variável. Nas outras situações, a recuperação de calor na UTAN, num clima com amplitudes térmicas moderadas, não compensa a energia despendida para movimentar o ar através dos seus dois circuitos de ar.

Por outro lado, se o GPFC tiver recuperador total de calor, este irá fixar a temperatura de condensação nos períodos de recuperação. Necessitando a instalação de uma carga de aquecimento reduzida, a energia recuperada não compensa o acréscimo de consumo por via da redução da eficiência da máquina. Além do acréscimo de consumo na máquina, há ainda a considerar a energia de bombagem do caudal de água de recuperação, cujo caudal é necessariamente superior ao caudal do circuito de arrefecimento. É interessante verificar que a possibilidade de recuperação de calor total não é considerada nos primeiros milhares de combinações de menor consumo de energia.

Finalmente, a utilização de um GPFC *scroll* em vez de um de parafuso relaciona-se com a capacidade de adaptação às cargas parciais no caso em questão.

Fazendo agora uma avaliação parâmetro a parâmetro, pode concluir-se dos efeitos que cada um terá no consumo de energia. As conclusões desta análise são estritamente válidas para os casos em que exista independência entre os parâmetros. Use-se como caso base o sistema anteriormente descrito, que utiliza recuperador na UTAN, equivalendo à combinação de todos os parâmetros a -1, excepto o r_c que será colocado a +1.

Neste caso, a eficiência média do GPFC em modo de arrefecimento é de 4,2, enquanto que na situação de projecto a eficiência seria de 4,9.

Os resultados com maior redução no consumo de energia ocorrem quando são introduzidos motores mais eficientes (-3,1%), menor perda de carga no circuito de ventilação (-5,6%), GPFC mais eficiente (-6,2%) e caudal variável no ventilador (-6,2%, igualmente). Os maiores aumentos do consumo de energia ocorrem com a utilização do GPFC de parafuso (+4,9%) e com a recuperação total (+6,6%).

Analisando a totalidade das combinações, verifica-se que a eficiência do GPFC em modo de arrefecimento varia entre 3,6 e 6,0.

Em média, a percentagem de consumo das máquinas frigoríficas representa 60% do consumo total do sistema de climatização; o consumo dos ventiladores da UTAN, 16%; o consumo nas bombas, 9%; e o das unidades terminais e ventilador, 14%.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

É ainda interessante verificar que o somatório para todas as hipóteses de sistemas, dos consumos dos ventiladores da UTAN na situação sem recuperador, se reduz em apenas 1% quando o caudal passa de constante a variável, com controlo de pressão, mas em 33% se o controlo seguir a linha da instalação. Situação análoga ocorre com o consumo das bombas, em que os valores se reduzem em 1% e em 17% nas situações correspondentes para o controlo de caudal variável nas bombas.

O consumo nos ventiloconvectores é muito sensível às temperaturas da rede hidráulica: aumentando a diferença de temperatura, o consumo aumenta 71%; aumentando a temperatura da rede, o consumo aumenta 47%; aumentando ambas, 158%.

Ou seja, pode concluir-se, com base nas variações de cada um dos parâmetros, que no projecto de um sistema de climatização eficiente deve ter-se especial atenção na especificação da velocidade de passagem nas UTAs, da eficiência dos GPFCs e da classe dos motores. O controlo de caudais deve permitir que o ponto de funcionamento siga a característica da instalação. A variação da temperatura das redes deve ser analisada com cuidado assim como a escolha de recuperadores de calor na UTA ou no GPFC.

Estas conclusões podem ser retiradas das análises paramétricas ou de médias de consumo calculadas. No entanto, como foi verificado, alguns parâmetros interferem entre si. Assim, passaremos nas secções seguintes a analisar não só os efeitos de cada parâmetro mas também os efeitos conjugados que os diversos parâmetros causam no consumo de energia.

6.12 Superfície de Resposta

Para o efeito, apresenta-se nesta secção o método da superfície de resposta (RSM¹), e em seguida a matriz de interdependências dos parâmetros indicados no Quadro 6.6.

Seja X a matriz dos n_x estados das p_x variáveis independentes e E o vector da variável dependente. No exemplo presente, n_x é igual a 49.152 e p_x a 15. “E” contém o consumo de energia total do sistema de climatização, sendo a população amostra de dimensão n_x . Pode ser ajustada por uma função polinomial $Pol(X)$ de segunda ordem, originando um vector \hat{E} , da forma da equação a seguir apresentada [6.4]:

$$\hat{E} = Pol(X) = b_0 + \sum_{i=1}^{p_x} b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{p_x} \sum_{j>i}^{p_x} b_{i,j} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^{p_x} b_{i,i} \cdot X_i^2 \quad (6.1)$$

Nesta equação os termos b_i são constantes. As parcelas $b_i X_i$ são relativas aos termos lineares, as $b_{i,j} X_i X_j$ relativas às interacções entre variáveis e as expressas por $b_{i,i} X_i^2$,

¹ RSM – Response Surface Method

relativas aos termos quadráticos. O ajustamento poderá ser linear, linear com interacção ou quadrático, consoante contiver os termos respectivos. Um ajustamento linear com interacção é, portanto, determinado por:

$$\hat{E} = \text{Pol}_{\text{lin}}(X) = b_0 + \sum_{i=1}^{p_x} b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{p_x} \sum_{j>i}^{p_x} b_{i,j} \cdot X_i \cdot X_j \quad (6.2)$$

Os termos b podem ser obtidos a partir da minimização do somatório das diferenças quadráticas entre E e \hat{E} , expressas por $\sum_{i=1}^{n_x} (E_i - \hat{E}_i)^2$.

A escolha entre diversas equações de ajustamentos deve recair na que tenha menor resíduo, r_{aj} , dado por:

$$r_{aj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} (E_i - \hat{E}_i)^2}{(n_x - p_x)} \quad (6.3)$$

Usando a média de E , \bar{E} , uma medida do afastamento entre E e \hat{E} , é dada por $\frac{\sqrt{r_{aj}}}{\bar{E}}$.

A comparação entre as distribuições de E e \hat{E} pode ser feita avaliando os intervalos de confiança da média e do desvio padrão das distribuições [6.8].

A média \bar{E} segue uma distribuição t Student, que para n grande pode ser aproximada por uma distribuição normal, $N(\mu, \sigma)$ em função da média μ e do desvio padrão σ . Para n_x grande, o desvio padrão σ pode ser aproximado pela estatística empírica correspondente, s .

Determina-se o intervalo de confiança de σ^2 usando a amostra independente E_i , com o estimador $\gamma^2 = \sum_{i=1}^{n_x} \left(\frac{E_i - \mu}{\sigma}\right)^2$, que segue uma distribuição χ^2 com n_x graus de liberdade. Estas distribuições têm valor esperado $E(\gamma^2) = n_x$ e variância $V(\gamma^2) = 2n_x$, podendo ser aproximadas pela distribuição normal para n_x grande.

Do exposto, conclui-se que o intervalo da média μ , para um nível de significância, sg , a que corresponda um quantil λ , é dado por:

$$\text{Ic}(\mu) = \left(\bar{x} - \lambda \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n_x}}, \bar{x} + \lambda \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n_x}} \right) \quad (6.4)$$

Sendo que, para um nível de significância de 5%, λ é 1,96.

Usando a distribuição χ^2 o intervalo de σ^2 é dado por:

$$\text{Ic}(\sigma^2) = \left(\frac{n_x \cdot s^2}{a_1}, \frac{n_x \cdot s^2}{a_2} \right) \quad (6.5)$$

Em que a_1 e a_2 são obtidos de $P(\gamma^2 < a_1) = sg$, $P(\gamma^2 > a_2) = sg$. Para n_x grande, γ^2 pode ser aproximada por uma distribuição normal.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Os intervalos referidos nas equações (6.4) e (6.5) podem também ser aplicados ao erro entre a amostra e o ajustamento dado por, $E - \hat{E}$. Para n_x grande é razoável admitir que esta diferença segue uma distribuição normal.

A adequação entre os dados da população amostra e os valores obtidos do ajustamento pode ser avaliada usando a estatística $\varphi = \frac{n_1}{n_1 - 1} \cdot \frac{n_2 - 1}{n_2} \cdot \frac{s_1^2}{s_2^2}$, que segue uma distribuição F de Snedecor. Esta estatística relaciona os desvios padrão de ambas as distribuições. Nesta expressão, n_1 e n_2 são as dimensões da amostra e do ajustamento, a que correspondem desvios padrão empíricos s_1 e s_2 . Sendo $n_1 = n_2$, a estatística é então:

$$\varphi = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (6.6)$$

Pelo que o intervalo de confiança para a relação das variâncias é obtido de:

$$Ic \left(\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \right) = \left(a_1 \cdot \frac{s_2^2}{s_1^2}, a_2 \cdot \frac{s_2^2}{s_1^2} \right) \quad (6.7)$$

Com a_1 e a_2 determinados dos níveis de significância usando a distribuição F. Sendo n_x grande, F pode ser aproximada pela normal. Tendo as distribuições o mesmo número de graus de liberdade n_x , o valor esperado e a variância de φ são dados por:

$$E(\varphi) = \frac{n_x}{n_x - 2}, \quad V(\varphi) = \frac{2 \cdot n_x^2 \cdot (2 \cdot n_x - 2)}{n_x \cdot (n_x - 2)^2 \cdot (n_x - 4)} \quad (6.8)$$

Retornando à equação da superfície de resposta, caso esta tenha elementos de diversas ordens, alguns dos valores de b podem ser desprezados face à grandeza dos restantes. Com os valores considerados significativos, b_{nv} , pode obter-se uma nova estimativa de E , E_{nv} . Na secção seguinte, efectuar-se-á a comparação entre a população E e os valores obtidos pelos ajustamentos \hat{E} e E_{nv} .

6.13 Principais Parâmetros

Utilizando o método descrito na secção anterior aplicado às 49.152 combinações geradas, obtém-se as superfícies que melhor se adaptam aos resultados pelo critério dos mínimos quadrados. Para o efeito utilizou-se um programa RSM de ajustamento, proveniente de uma biblioteca do MatLab, que considera as possibilidades de ajustamento com funções lineares, com funções lineares com interacção e com funções quadráticas.

Sendo E o vector dos dados do consumo de energia e \hat{E} o resultado da aplicação de X à função de ajustamento, o mínimo de r referido na equação (6.3) permite a escolha entre as funções de ajustamento obtidas. A comparação dos resultados dos vários métodos de ajustamento é indicada no quadro seguinte:

Método	Linear	Linear com interacção	Quadrática
$\sqrt{r_{aj}}$	$7,72 \times 10^5$	$6,18 \times 10^5$	Matriz singular

Quadro 6.7. Valores de \sqrt{r} para as superfícies de ajustamento

Com base neste critério, a superfície linear com interacção, conforme expressa na equação (6.2), é a que melhor se ajusta aos dados de origem. Utilizando este ajustamento, obteve-se os 121 coeficientes b dessa equação, que permitem calcular o vector dos valores estimados \hat{E} . Uma medida do afastamento entre E e \hat{E} pode ser dada pela relação $\frac{\sqrt{r_{aj}}}{E}$.

Para a situação presente, este coeficiente toma o valor de 2,7%. A média das diferenças entre E e \hat{E} é da ordem de 10^{-9} , e, aplicando-se a equação (6.4) o intervalo do erro da média enquadra-se em $\pm 0,02\%$. A correlação entre as distribuições é de 95,5%. Com nível de significância de 5%, pode afirmar-se que ambas as distribuições têm a mesma média, mas, no entanto, a aplicação da equação (6.7) não permite aceitar a hipótese, de os seus desvios padrão serem iguais.

As relações entre as variáveis do Quadro 6.6 podem ser expressas com base nos valores dos coeficientes b da equação de ajustamento. Como interessa avaliar as principais relações entre as variáveis, despreza-se os coeficientes b de menor ordem. Utilizando apenas os valores de b das ordens 5 a 7, obtém-se uma nova função de ajustamento Pol_{nv} . Usando esta função, obtém-se novas estimativas do consumo de energia, designadas por E_{nv} .

Designa-se por b_{nv} os novos coeficientes da superfície de ajustamento. Interessa avaliar se as distribuições de \hat{E} e de E_{nv} podem ser consideradas equivalentes. As médias de ambas as distribuições são iguais a $2,228 \times 10^7$ W. Mais uma vez, a aplicação do teste F de

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Snedecor não permite aceitar a possibilidade de as distribuições serem iguais, com 5% de nível de significância. No entanto, a correlação entre ambas é de 0,99.

A existência de médias iguais e elevadas correlações entre as distribuições leva a concluir, que embora não sejam iguais, os fenómenos físicos presentes na distribuição E possam ser observáveis em E_{nv} .

Os coeficientes b_{nv} podem ser expressos numa matriz em que os elementos b_i ocupam a diagonal principal e os elementos b_{ij} da equação de ajustamento formam uma matriz triangular superior. A relação da posição dos elementos b no vector e na matriz S_p correspondente é dada da seguinte forma: $S_p(i,i+1:p)=b(k:k+p-i-1)$, $i=1:p$.

Os resultados são expressos no Quadro 6.8, em que apenas se apresentam os elementos significativos de b , divididos por 10^5 e truncados. Um elemento negativo indica uma redução do consumo de energia quando as variáveis têm estados +1; um elemento positivo significa, para as mesmas condições, um aumento do consumo de energia.

$b_{nv} \cdot 10^{-5}$	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
cvv	-8							-3							
cvb		-1													
rc			+1		-1							1			
eff				-2											
dpmv					-6										
dpmb															
clf															
qcv								-3							
qcb									-1						
tev															
eer											-4	2			
rch												15			
ccpch													5		
dtM														4	
isl															

Quadro 6.8. Coeficientes $b \cdot 10^{-5}$ truncados (considera recuperação total)

Comparando os resultados com a equação (5.2), podem retirar-se as seguintes conclusões: A relação entre a recuperação (rc) e a perda de carga (dpmv) está expressa na relação entre RF 4.3 e RF 4.9. Por outro lado, caso haja recuperação total, a relação entre eer e rch implica a relação entre RF 4.7 (escolher a eficiência do GPFC) e RF 4.5 (recuperador do GPFC).

Na equação (5.2) surgem ainda outras relações aplicáveis ao caso presente: RF 4.7 (escolher a eficiência do GPFC) e RF 5.8 (escolher temperatura de evaporação) são relacionadas com RF 4.10 (temperaturas de aquecimento e arrefecimento dos circuitos) que, embora existente em termos físicos, não aparece no Quadro 6.8, porque o respectivo coeficiente é de ordem inferior a 10^5 .

Esta matriz confirma algumas das afirmações expressas na secção 6.11. A recuperação de calor no GPFC e o funcionamento a carga parcial de um GPFC de parafuso, contribuem fortemente para o aumento do consumo de energia.

Por outro lado, o caudal variável nos ventiladores e a redução da perda de carga no circuito da UTAN são as variáveis que mais fortemente contribuem para a redução do consumo de energia. O caudal variável nas bombas tem alguma expressão, mas bastante menor que o caudal variável do ar. O caudal variável das bombas ou dos ventiladores deve, preferencialmente, ser associado a sistema de controlo que avalie as necessidades do caudal necessário, evitando fixar uma pressão na rede. Note-se que a escolha de caudal variável nas bombas é sobretudo uma medida tecnológica, que garante a temperatura constante no fornecimento de água às cargas do sistema.

A classe de fugas e o isolamento das tubagens não têm expressão significativa.

Há ainda vantagem na utilização de máquinas frigoríficas com maior EER, muito embora a sua eficiência seja afectada negativamente pela recuperação de calor. Finalmente, há vantagens na utilização de motores de classe EFF1.

Por outro lado, a recuperação no GPFC e a utilização de máquinas frigoríficas com compressores de parafuso são desaconselháveis para esta situação. De notar ainda, os efeitos negativos do aumento da diferença entre a temperatura de ida e de retorno e a inexistência de expressão relativamente à temperatura do circuito de água fria.

Desta análise salienta-se as seguintes conclusões relativas à redução do consumo de energia:

As principais medidas de redução do consumo de energia são devidas à variação do caudal na UTAN e à redução da sua perda de carga interna;

O aumento de temperatura no circuito de arrefecimento e o aumento da diferença de temperatura entre a ida e retorno não reduzem o consumo de energia;

A recuperação na UTAN não contribui para a redução do consumo de energia;

A recuperação total de calor no GPFC deve ser evitada.

Note-se, no entanto, que o Quadro 6.8 não expressa a aparente vantagem de utilização de recuperação parcial, uma vez que coloca na mesma variável a recuperação total e a parcial. A utilização da variável r_{ch} com três níveis esconde o efeito da recuperação parcial. Removendo os dados relativos à recuperação total dos estados X e dos consumos de energia E, obtém-se o seguinte quadro:

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

$b_{nv} \cdot 10^{-5}$	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
cvv	-8							-3							
cvb		-1													
rc					-1										
eff				-2											
dpmv					-6										
dpmb															
clf															
qcv								-3							
qcb									-1						
tev															
eer											-6				
rch												-4			
ccpch													5		
dtM														4	
isl															

Quadro 6.9. Coeficientes $b \cdot 10^{-5}$ truncados (sem recuperação total)

Este quadro evidencia a vantagem de utilização da recuperação parcial. Utilizando recuperação parcial não há interferência entre a recuperação e a eficiência das máquinas frigoríficas. Permite então concluir-se que:

Deve ser utilizada a recuperação parcial, mas a recuperação total não contribui para a redução do consumo de energia.

Do exposto, há que analisar a aparente desvantagem na utilização de temperaturas mais elevadas nos circuitos de água e maiores diferenças de temperaturas. A primeira opção determina o aumento da eficiência do ciclo frigorífico; a segunda determina uma menor energia de bombagem. No entanto, qualquer destas opções obriga a utilizar unidades terminais de maior dimensão o que implica um maior consumo de energia nos seus ventiladores.

Correndo de novo os programas apresentados no esquema da Figura 6.1, mas tomando como constante a energia associada às unidades terminais, obtém-se que o aumento de temperatura no evaporador (tev) e o aumento da diferença de temperaturas entre a ida e retorno (dtM) passam a ser significativos para a redução do consumo de energia.

Note-se que esta solução não é tecnicamente possível com os ventiloconvectores. Utilizando o paradigma de maiores temperaturas e maiores diferenças de temperatura, foram propostas as soluções de tectos arrefecidos e de unidades de indução. Avaliar-se-á no capítulo seguinte as consequências da sua instalação, quer em termos de conforto e de qualidade do ar, quer em termos de consumo de energia.

6.14 Resumo e Conclusões

Neste capítulo, analisou-se, por variações paramétricas, os PPs relativos à construção do edifício e ao sistema de climatização. Para o efeito foi utilizado o programa Energy Plus modelando-se o sistema de climatização com o módulo Purchased Air. Os resultados de simulações em três edifícios foram pós processadas, de modo a quantificar-se os consumos no sistema de climatização.

Muito embora as conclusões retiradas das simulações efectuadas sejam válidas apenas para os casos simulados, a existência de razões físicas para as conclusões permite generalizá-las, estendendo-as a outros edifícios com o mesmo tipo de utilização. Neste sentido, conclui-se que as principais cargas que influenciam o consumo no edifício são as relativas a equipamentos e à iluminação. A utilização de equipamento ou iluminação mais eficiente permite reduzir a energia consumida directamente e reduz ainda a energia despendida no sistema de climatização.

Um edifício com elevada percentagem de envidraçados a sul e com controlo de iluminação é energeticamente eficiente.

As afirmações anteriores são geralmente consensuais. No entanto, as que em seguida se indicam são geralmente contrárias à interpretação comum destas matérias:

Existindo controlo de iluminação, a substituição de envidraçados neutros por envidraçados coloridos, com menor factor solar, resulta num acréscimo no consumo de energia;

É possível duplicar o caudal de ar novo, melhorando as condições interiores, sem que haja aumento significativo do consumo de energia. Na realidade, desde que o arrefecimento gratuito seja aproveitado, a energia poupada permite compensar o aumento do consumo associado à ventilação;

A alteração da massa interna do edifício ou o aumento no isolamento da envolvente não contribuem para a redução do consumo de energia.

Considerando o consumo de energia no sistema de climatização do primeiro edifício, obteve-se diversas conclusões, das quais se destacam:

A redução do consumo numa instalação de climatização é sobretudo dependente das condições de funcionamento da UTAN, sendo pouco dependente de melhorias introduzidas na rede hidráulica;

A recuperação de calor na UTAN agrava geralmente o consumo de energia. A sua utilização deve ser associada a unidades com reduzida velocidade facial e caudal variável;

As UTAN devem utilizar caudal variável nos ventiladores, controlado em função das necessidades de caudal, evitando-se o controlo por pressão;

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A recuperação total de calor no GPFC é uma solução que contribui para o aumento do consumo de energia, ao contrário do que ocorre se for usada a recuperação parcial;

Deve ser dada especial atenção à adaptação do GPFC a cargas parciais;

Os regimes de temperaturas no circuito de água conducentes a aumento de temperatura média só devem ser usados se não implicarem aumento de consumo da energia necessária à movimentação do ar.

Muito embora as conclusões expostas sejam aplicáveis estritamente ao exemplo apresentado, edifícios com utilizações e sistemas análogos terão comportamentos similares.

Pelas razões enunciadas deve evitar-se preconizar soluções gerais de redução do consumo de energia. Deve sim, formular-se códigos de boas práticas ou regulamentos por tipo de aplicação, considerando-se o sistema e o edifício.

6.15 Contributos, Opinião e Prosseguimento

São contributos deste trabalho a simulação de vários edifícios por variação paramétrica. Foi realizado um programa de cálculo do consumo de energia no sistema de climatização, em função de quinze variáveis. Foram ainda geradas as diversas combinações e definidas as variáveis relevantes para a redução do consumo de energia e suas relações.

Será interessante prosseguir este trabalho analisando as condições de construção de bombas e ventiladores para funcionamento óptimo a cargas parciais; analisar as correctas aplicações para máquinas frigoríficas com recuperação parcial e total; repetir as análises expostas em edifícios comerciais, hotéis e residenciais de modo a averiguar a importância relativa dos parâmetros de projecto nestas situações; e, por último, repetir a análise em climas de diversas cidades de Portugal e da Europa, de modo a compreender quais as especificidades regionais.

Propõe-se ainda a realização de testes de campo que permitam avaliar os efeitos do aumento do caudal de ar novo, da recuperação de energia do ar de exaustão e da recuperação de calor em máquinas frigoríficas.

A redução do consumo de energia em edifícios de escritórios passa sobretudo pela redução das cargas internas e pela utilização de iluminação natural. É ainda conveniente a utilização de sistemas mistos de ventilação natural e forçada, que reduzam os consumos nas UTAs.

A utilização destes pressupostos implica rever a arquitectura dos edifícios, numa primeira fase, e conhecer o modelo de desenvolvimento das cidades.

Este caminho afasta-se do que vem sendo traçado para reduzir o consumo de energia.

Capítulo 7

Aplicação do Primeiro Axioma

«... mas o português é o povo do “e” – uma coisa
“e” outra coisa, conforme as ocasiões ...»

Agostinho da Silva, in *Conversas com Agostinho da Silva*

7.1 Introdução

Uma das características do mercado nacional é o facto de ser muito receptivo a todas as tendências tecnológicas. Por esta razão, algumas firmas habituaram-se a testar no nosso mercado os novos produtos que pretendem lançar no mercado europeu ou internacional. Esta capacidade de integrar um “e” outro produto, por vezes de características antagónicas, permite-nos ter contacto com os mais recentes sistemas e, subsequentemente, criar uma opinião sobre eles.

É neste sentido que analisamos neste capítulo alguns dos sistemas de climatização existentes, aplicando para o efeito a primeiro axioma da Teoria Axiomática de Projecto (AP). Estes sistemas foram apresentados no capítulo quarto, no qual se iniciou a decomposição entre funções e parâmetros. Foi também discutido o seu comportamento e identificadas algumas situações em que os sistemas funcionam fora do intervalo admissível.

Apresenta-se de seguida as equações de projecto de cada um dos sistemas analisados e identifica-se eventuais acoplamentos existentes. Este desenvolvimento segue de perto um nosso artigo recentemente publicado na revista *Energy and Buildings* [7.1]. De seguida, assinala-se as consequências da existência destes acoplamentos, com base na modelação do funcionamento do sistema de climatização respectivo, utilizando o edifício de referência já usado no capítulo anterior. Note-se que os acoplamentos identificados e as consequências têm por base a decomposição apresentada no capítulo quarto, que foi realizada até ao nível três de decomposição. Deste modo, os resultados obtidos são válidos para todos os sistemas que adoptem os mesmos pressupostos, quaisquer que sejam as escolhas de projecto de níveis de decomposição mais detalhados.

São também estimados os consumos de energia dos diversos sistemas de climatização considerados, para o que se criaram programas para cada um dos sistemas, a partir do programa descrito no capítulo anterior.

7.2 A Independência nos Sistemas de Climatização

De acordo com o primeiro axioma da AP, os sistemas escolhidos devem ser ou independentes ou desacopláveis. Nesta secção, verifica-se quais os sistemas que cumprem este axioma e faz-se a sua classificação.

Para facilitar a leitura, reedita-se e junta-se nesta secção as figuras apresentadas no capítulo terceiro e quinto relativas ao mapeamento de projecto dos sistemas considerados. No capítulo terceiro, Figura 3.3, foi apresentado o mapeamento das funções RF 1.1, relativa a “assegurar condições térmicas apropriadas”, e a RF 1.2, relativa a “assegurar ambientes interiores saudáveis”. No quinto, após uma visão geral sobre o consumo de energia num edifício, detalhou-se a função RF 2.10, “reduzir o consumo de energia do sistema AVAC”.

A Figura seguinte agrega o mapeamento expresso na Figura 3.3 com os dois primeiros níveis de decomposição incluídos no RF 2.10, apresentados anteriormente na Figura 5.5. De notar que este requisito surge agora com a designação RF 1.3.

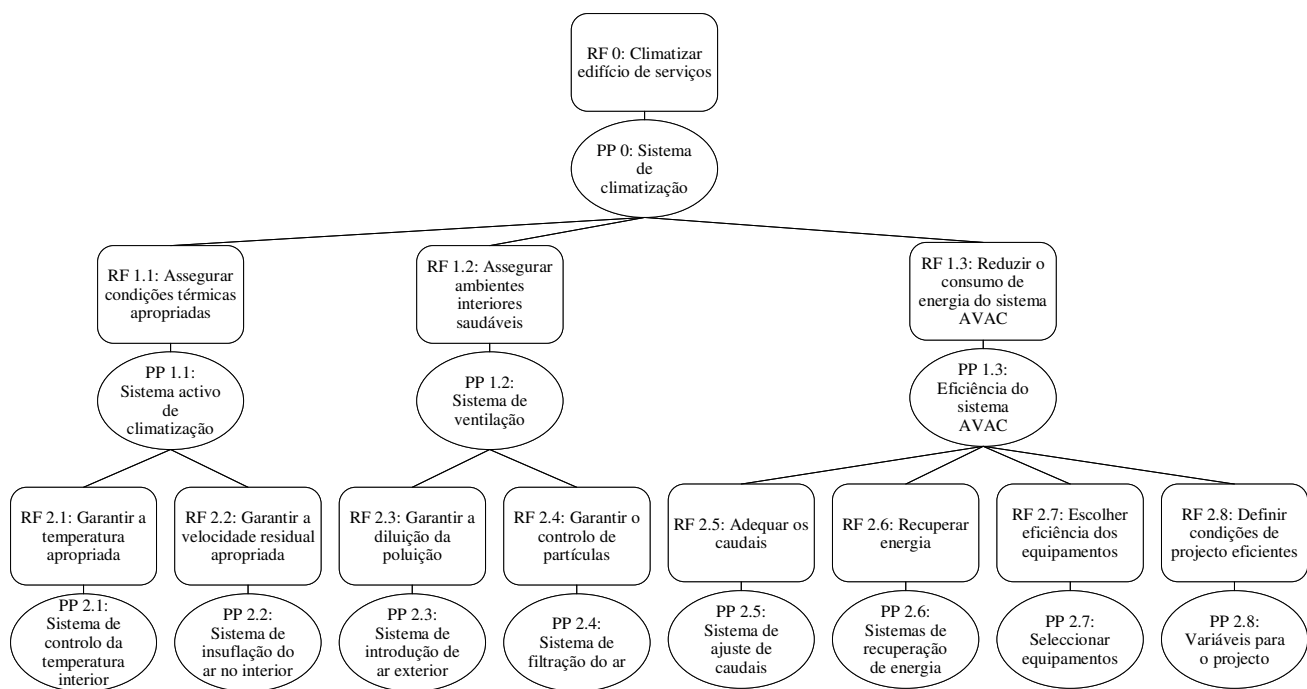


Figura 7.1. Mapeamento de projecto de sistemas AVAC até ao nível 2

Este mapeamento será complementado até ao nível 3, de acordo com as características de cada um dos sistemas considerados.

Optou-se, deliberadamente, por não apresentar todos os níveis de decomposição do RF 1.3, de modo a não sobrecarregar a figura com um grau de detalhe desnecessário à apresentação dos parágrafos seguintes. Nas figuras de cada um dos sistemas, não surgirão os requisitos RF 2.5 a RF 2.8 e respectivos parâmetros, por a decomposição de RF 1.3 ser

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

igual em todos os sistemas. Nestas figuras, os RFs e os PPs correspondentes a dois espaços genéricos estão separados, sendo visíveis os do espaço (n). Usa-se o símbolo “+” para assinalar os relacionamentos em que existam espaços em modo de aquecimento e o “A” para os devidos ao ar novo sobre-arrefecido.

7.2.1 Sistemas VAV

Na figura seguinte, apresenta-se a decomposição dos parâmetros PP 2.1 a PP 2.4 de um sistema VAV. Da descrição efectuada no capítulo quarto, salienta-se a relação que existe entre as funções “garantir a diluição da poluição” e “garantir a temperatura apropriada”.

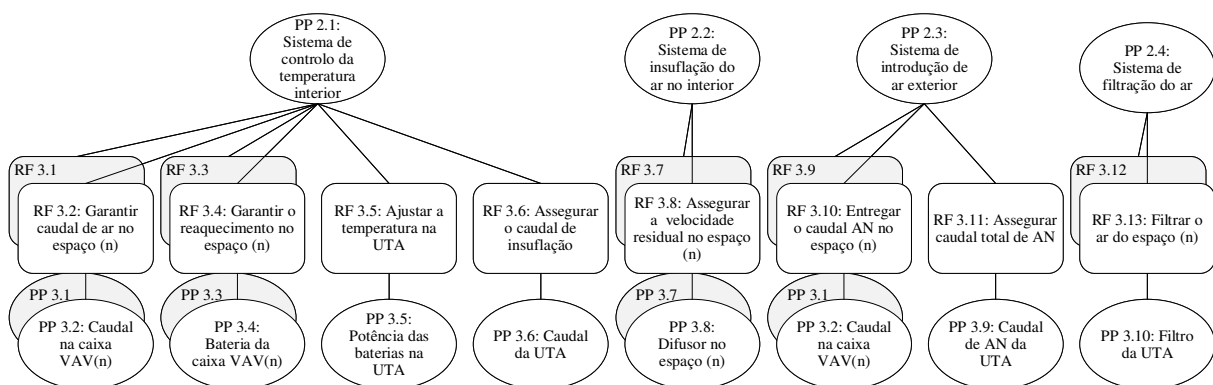


Figura 7.2. Mapeamento do projecto do sistema VAV a partir do nível 2

O conjunto de relacionamentos entre as funções e os parâmetros deste sistema é expresso na equação de projecto (7.1), em que, para facilidade de leitura, se inscreveram linhas de separação entre os vários níveis de decomposição. Da análise desta equação, verifica-se que o número de parâmetros de projecto é inferior ao número de funções a desempenhar, pelo que, de acordo com a Teoria Axiomática de Projecto, o sistema é acoplado.

No segundo nível de decomposição, os elementos da matriz de projecto $a_{i,j} \ i \neq j$ mostram que fixando-se a função RF 2.1 “garantir a temperatura apropriada” as funções RF 2.3, RF 2.4 e RF 2.5 são directamente influenciadas: a função RF 2.3 “garantir a diluição da poluição”, depende do “sistema de controlo da temperatura interior”, PP 2.1; existindo um caudal variável a filtração do ar variará com o caudal de cada instante, pelo que a função RF 2.4, “garantir o controlo de partículas”, será influenciada; assim como RF 2.5 “adequar os caudais”, neste caso apenas os caudais de ar insuflado, dado ser este o modo usado pelo sistema para garantir a temperatura interior.

No nível três da decomposição, esta especificidade é visível em “assegurar o caudal de insuflação”, RF 3.6, que depende directamente dos caudais nas caixas VAV, PP 3.1 e PP 3.2. Esta influência não é exclusiva, porque o PP 3.6 é materializado pelo sistema de

Aplicação do Primeiro Axioma

ventilação da UTA. Individualmente, o “caudal na caixa VAV”, PP 3.1 e PP 3.2 têm ainda influência fraca em cada uma das salas respectivas, sobre as funções RF 3.7 e RF 3.8, “assegurar a velocidade residual no espaço” e sobre as funções RF 3.12 e RF 3.13, “filtrar o ar do espaço”. Concretizar as funções relativas à filtração depende sobretudo do filtro da UTA, PP 3.10.

O aspecto mais relevante deste sistema é assinalado no bloco da matriz presente entre as linhas de RF 3.9 e RF 3.10, “entregar caudal de AN no espaço” e as colunas PP 3.1 e PP 3.2, “caudal na caixa VAV”. Este bloco evidencia que o caudal de ar novo de cada espaço depende do seu próprio caudal e do de todos os restantes.

O elemento da linha RF 3.11 surge numa posição $i \neq j$, muito embora por troca de linha com RF 3.9 pudesse surgir sobre a diagonal. Como os “cauda(is) na(s) caixa(s) VAV”, PP 3.1 e PP 3.2, são sujeitos a valores mínimos, que permitam “garantir o reaquecimento no espaço”, nas linhas de RF 3.3 e RF 3.4 surgem estes efeitos assinalados com “+”. Os caudais de ar mínimos são, aliás, necessários às restantes funções, constituindo uma restrição do sistema.

[illegible]

Note-se que mesmo que a função relativa à filtração não seja considerada, o acoplamento da matriz mantém-se, porque o número de parâmetros de projecto é inferior ao número de requisitos funcionais. Nessa situação, ficariam no nível três de decomposição 11

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

RFs e apenas 9 PPs, porque os parâmetros PP 3.1 e PP 3.3 são utilizados não só para cumprir as funções RF 3.1 e RF 3.2, mas também para as funções RF 3.9 e RF 3.10.

O sistema seria desacoplável se fosse utilizado apenas para “assegurar as condições térmicas apropriadas”, função para a qual foi originalmente desenhado. A inclusão de uma nova função “assegurar ambientes interiores saudáveis”, sem alteração profunda do sistema, tornaram-no acoplado. Para resolver esta situação, a ASHRAE 62.1 permite que o sistema de introdução de ar exterior seja libertado do cumprimento das suas funções, em períodos longos.

7.2.2 Sistemas com ar novo dedicado e ventiloconvectores

Na figura seguinte apresenta-se a decomposição de um sistema com ar novo dedicado e ventiloconvectores, assumindo-se a situação de um sistema a quatro tubos. Nesta decomposição, o número de parâmetros de projecto é igual ao número de requisitos funcionais. A equação (7.2) define a equação de projecto mostrando um projecto independente, à excepção de alguns efeitos menores associados à escolha do caudal no VC. Há ainda uma relação fixa com os caudais dos espaços. Sendo o projecto independente, qualquer requisito pode variar livremente.

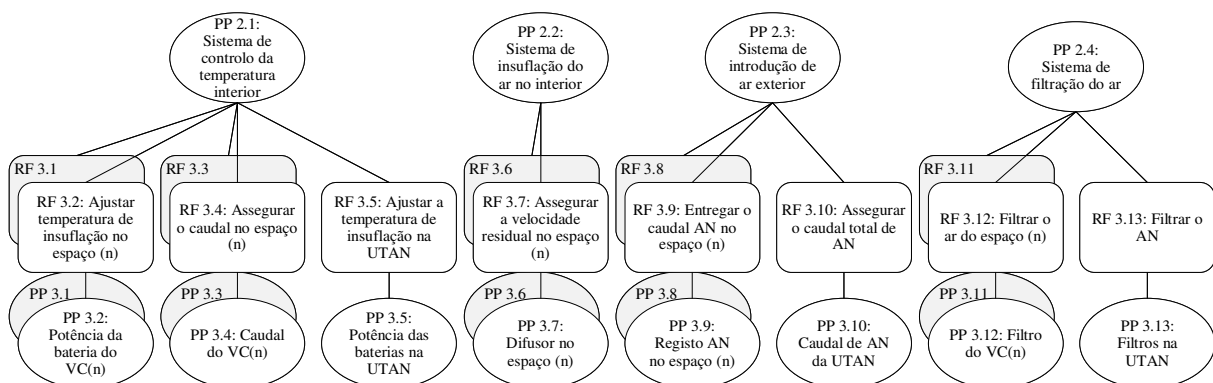


Figura 7.3. Mapeamento do projecto de um sistema com ventiloconvectores

A variação do caudal dos VC implica alterações menores no ajuste da temperatura de insuflação, na velocidade do ar residual nos espaços e na filtração efectuada. No entanto, desde que os VC sejam projectados para funcionar a uma velocidade fixa, os elementos externos à diagonal principal desaparecem.

No entanto, tudo indica que o mercado irá optar por ventiloconvectores com velocidade variável, de modo a reduzir o consumo de energia nestes equipamentos. Neste caso, a modulação da carga em cada espaço será determinada pela velocidade de rotação do ventilador, quando a posição da válvula que regula a potência da bateria, estiver aberta. Esta válvula deverá ser do tipo *on/off*.

RF0	X			PP0
RF1.1	X			PP1.1
RF1.2		X		PP1.2
RF1.3			X	PP1.3
RF2.1			X	PP2.1
RF2.2				PP2.2
RF2.3			X	PP2.3
RF2.4				PP2.4
RF2.5			X	PP2.5
RF2.6				PP2.6
RF2.7			X	PP2.7
RF2.8				PP2.8
RF3.1			X	PP3.1
RF3.2				PP3.2
RF3.3			X	PP3.3
RF3.4				PP3.4
RF3.5			X	PP3.5
RF3.6				PP3.6
RF3.7			X	PP3.7
RF3.8				PP3.8
RF3.9			X	PP3.9
RF3.10				PP3.10
RF3.11			X	PP3.11
RF3.12				PP3.12
RF3.13			X	PP3.13

=

*

(7.2)

7.2.3 Sistemas com ar novo dedicado e tectos arrefecidos

Num sistema com tectos arrefecidos, o número de RFs a desempenhar é superior ao número de PPs, pelo que o sistema é acoplado. No entanto, se não forem consideradas as funções de “filtrar o ar do espaço” então o sistema tem igual número de RF e de PP. Em consequência, em determinadas condições, o sistema é independente.

A Figura 7.4 ilustra a decomposição dos níveis 2 e 3 para as funções associadas ao conforto térmico e à qualidade do ar, RF 1.1 e RF 1.2.

Como referido, as funções RF 2.5 a RF 2.8 mantêm-se presentes na equação de projecto (7.3).

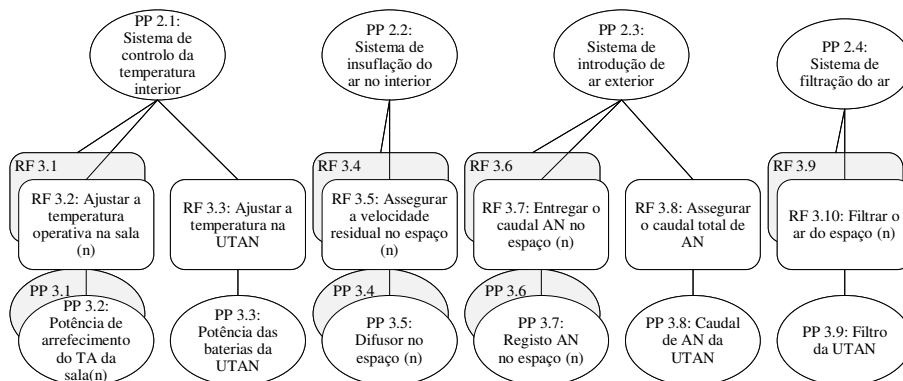


Figura 7.4. Mapeamento do projecto de um sistema com tectos arrefecidos

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A matriz de projecto expressa no segundo nível de decomposição, que, fixar a temperatura de funcionamento dos painéis de modo a definir-se condições de projecto eficientes, RF 2.9, depende em certa medida da temperatura interior PP 2.1.

No nível três de decomposição, surge o bloco de relações entre RF 3.1 e RF 3.2, com os respectivos parâmetros de projecto PP 3.1 e PP 3.2. Na realidade, estes sistemas não são projectados para funcionar em modo de aquecimento. Caso fossem utilizados para esse fim, o referido bloco evidencia que a satisfação de RF 3.1 em modo de arrefecimento, condiciona que RF 3.2 não possa estar em aquecimento e reciprocamente.

As funções RF 3.9 e RF 3.10 relativas a filtrar o ar nos diversos espaços dependem apenas do filtro da UTAN, PP 3.9, estando em certa medida dependentes do caudal de ar novo entregue em cada espaço, RF 3.6 e RF 3.7.

$$= \begin{array}{c} \text{RF0} \\ \text{RF1.1} \\ \text{RF1.2} \\ \text{RF1.3} \\ \text{RF2.1} \\ \text{RF2.2} \\ \text{RF2.3} \\ \text{RF2.4} \\ \text{RF2.5} \\ \text{RF2.6} \\ \text{RF2.7} \\ \text{RF2.8} \\ \text{RF3.1} \\ \text{RF3.2} \\ \text{RF3.3} \\ \text{RF3.4} \\ \text{RF3.5} \\ \text{RF3.6} \\ \text{RF3.7} \\ \text{RF3.8} \\ \text{RF3.9} \\ \text{RF3.10} \end{array} \cdot \begin{array}{c} \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{A} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{x} \\ \text{X} + \text{A} \\ + \text{X A} \\ \text{A A X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{X} \\ \text{x x X} \\ \text{x} \\ \text{X} \\ \text{x} \end{array} = \begin{array}{c} \text{PP0} \\ \text{PP1.1} \\ \text{PP1.2} \\ \text{PP1.3} \\ \text{PP2.1} \\ \text{PP2.2} \\ \text{PP2.3} \\ \text{PP2.4} \\ \text{PP2.5} \\ \text{PP2.6} \\ \text{PP2.7} \\ \text{PP2.8} \\ \text{PP3.1} \\ \text{PP3.2} \\ \text{PP3.3} \\ \text{PP3.4} \\ \text{PP3.5} \\ \text{PP3.6} \\ \text{PP3.7} \\ \text{PP3.8} \\ \text{PP3.9} \end{array} \quad (7.3)$$

Se o ar novo for utilizado sobre-arrefecido, “A”, a temperatura da UTAN, RF 3.3, influencia o processo de assegurar a temperatura operativa de cada sala, RF 3.1 e RF 3.2. Por outro lado, se a temperatura de insuflação na UTAN variar então RF 3.3 depende das potências de arrefecimento das, PP 3.1 e PP 3.2. Neste caso o sistema torna-se acoplado. Este sistema será simulado numa das secções seguintes.

Para resolver este acoplamento, normalmente a temperatura da UTAN é fixada, pelo que os tectos arrefecidos de cada espaço terão de garantir a carga remanescente. O sistema é então desacoplável. No entanto, caso a carga térmica interna seja diminuta, o ar novo arrefecido deverá causar desconforto por arrefecer alguns espaços abaixo da temperatura

de conforto. Esta situação constitui o principal problema da utilização desta solução, situação que será avaliada para um exemplo na secção 7.3.

Assim, se não for considerada a função relativa à filtração, se todo o sistema funcionar em modo de arrefecimento e se, ainda, o ar novo for insuflado a condições médias interiores, então este sistema é independente.

7.2.4 Sistemas com ar novo dedicado e unidades de indução

Na Figura 7.5 apresenta-se o mapeamento relativo aos sistemas com ar novo dedicado e unidades de indução. Note-se que o caudal de ar primário neste sistema é obrigatoriamente fixo constituindo uma restrição do sistema. Além disso, é sempre utilizado sobre-arrefecido, pelo que as relações assinaladas com “A” na matriz de projecto constituem uma característica do próprio sistema e não uma opção.

Como se verifica, existem no terceiro nível de decomposição doze funções mas apenas nove parâmetros de projecto. Deste modo o sistema é acoplado. Mesmo desprezando as duas funções associada à filtração, o sistema permanece acoplado. Note-se que os parâmetros PP 3.3 e 3.4 são utilizados para assegurar o caudal de indução, RF 3.3 e RF 3.4, assim como para entregar o caudal de ar novo, RF 3.8 e RF 3.9. Ou seja, existe uma dependência entre a quantidade de ar novo entregue em cada espaço e o sistema de controlo de temperatura.

Como as unidades de indução são desenhadas de modo a utilizarem um caudal de ar primário superior ao caudal de ar novo necessário para os espaços que servem, a dependência referida não causa geralmente problemas em termos de qualidade do ar. No entanto, como o caudal de ar primário é arrefecido e contribui para a remoção da carga interna, o acoplamento referido pode traduzir-se num arrefecimento exagerado dos espaços.

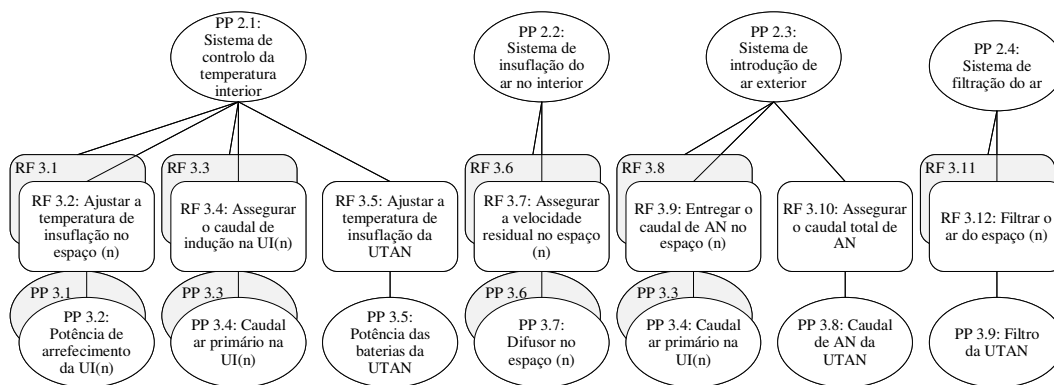


Figura 7.5. Mapeamento do projecto de um sistema com unidades de indução

Esta situação pode ser resolvida desde que sejam introduzidas baterias de reaquecimento nas UI.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A equação de projecto, para a situação descrita na figura anterior, é apresentada em (7.4). No nível dois de decomposição, verifica-se que definir as condições de projecto RF 2.8 depende do sistema de controlo de temperatura interior PP 2.1.

Esta equação reflecte ainda a dependência entre o sistema de controlo da temperatura interior e o do controlo do ar exterior. Na realidade, o caudal de ar primário PP 3.3 e PP 3.4 influenciam os requisitos funcionais relativos ao ar novo, RF 3.8 e RF 3.9, e em certa medida a velocidade residual do ar RF 3.6 e RF 3.7 e a filtração do ar RF 3.11 e RF 3.12.

[illegible]

A situação de menor desempenho do sistema é expressa no bloco entre RF 3.1, RF 3.2 e RF 3.5. A temperatura da UTAN, RF 3.5, depende das potências de arrefecimento necessárias nos espaços, PP 3.1 e PP 3.2. Por sua vez, o caudal de ar novo é utilizado para arrefecer os espaços interiores, pelo que as suas temperaturas RF 3.1 e RF 3.2 dependem do caudal de ar primário em cada sala PP 3.3 e PP 3.4 e da temperatura desses fluxos, assegurada por PP 3.5. A simulação destes acoplamentos será realizada na secção seguinte, para um exemplo.

De modo análogo aos sistemas de tectos arrefecidos, a existência de espaços em modo de aquecimento compromete o funcionamento dos restantes espaços em modo de arrefecimento. Estas situações são assinaladas com “+” na matriz de projecto. No caso deste sistema, estas situações são correntes, já que mesmo que todos os espaços estejam em modo de arrefecimento, alguns terão necessidade de reaquecer o ar primário, quando a

carga por este removida for superior à carga interna. Resolve-se este problema pela utilização de baterias de aquecimento nas UI, capazes de reaquecer o ar primário e suprir as necessidades de carga interna. Neste caso surgiriam duas novas funções, por exemplo “garantir o reaquecimento no espaço (n)”, a que corresponderiam dois novos parâmetros relativos à potência de reaquecimento das UI. Mesmo nesta situação, sem se considerar a filtração, o projecto teria ainda doze funções e dez parâmetros no nível três de decomposição, permanecendo acoplado.

A situação descrita refere-se à idealização do projecto. A sua concretização tecnológica obriga a que alguns parâmetros sejam tornados fixos. Deste modo, alguns acoplamentos são removidos.

Fixando-se a temperatura de insuflação na UTA os “A” da linha RF 3.5 desaparecem. Por outro lado, um determinado equipamento tem um valor constante de caudal de ar primário, ou melhor, é definida uma gama estreita de variação do caudal de ar primário. Deste modo, desaparecem as influências de PP 3.3 e PP 3.4 sobre RF 3.1 e RF 3.2. Finalmente, se for assegurado que o caudal de ar primário, PP 3.3 e PP 3.4, é sempre muito maior que o caudal de ar novo necessário, então os requisitos RF 3.3 e RF 3.4 são equivalentes aos RF 3.8 e RF 3.9. Assumindo-se todos estes pressupostos tecnológicos, assim como a utilização de baterias de aquecimento nas UI, então o sistema torna-se desacoplável. Designaremos esta situação de tecnologicamente desacoplável.

Note-se que uma incorrecta escolha do caudal de ar primário ou da sua temperatura implicam que o funcionamento do sistema ocorra diversas vezes fora do intervalo de projecto, apesar de ser desacoplado. Por outro lado, o sistema não permite que venham a surgir alterações aos caudais de ar novo ou às temperaturas dos circuitos de água.

Este exemplo ilustra a relação estrita que existe entre o primeiro e o segundo axiomas da AP.

Esta é mais uma situação em que a utilização de equipamentos auxiliares colmata o mau funcionamento intrínseco do sistema. Neste caso, são exemplos a aplicação de baterias de aquecimento e o acréscimo do ar novo. Estas soluções resultam em acréscimos de consumo de energia por implicarem soluções contraditórias.

7.3 Consequências da Aplicação do Primeiro Axioma

A apresentação anterior permitiu avaliar o funcionamento de diversos sistemas de acordo com o primeiro Axioma do Projecto Axiomático. Simular-se-á, nesta secção, o piso do edifício analisado no capítulo anterior, quando climatizado através de cada um dos sistemas expostos.

Quaisquer dos sistemas anteriormente descritos são adaptáveis às cargas deste piso. Na realidade, exceptuando a zona 5, onde a carga sensível máxima é de 71 W/m^2 , a carga sensível máxima nas restantes zonas é inferior a 60 W/m^2 . Do descrito no capítulo 4, conclui-se que estes valores são compatíveis com a utilização de qualquer dos sistemas considerados. Além disso, o perfil de cargas utilizado na simulação é igual em todas as zonas, pelo que as dissemelhanças das variações das cargas são pequenas e devidas sobretudo às cargas exteriores.

Esta situação, bem como o isolamento do ambiente exterior, originam cargas sensíveis nas várias zonas com elevada correlação cruzada. Em especial, no período de 1 de Abril a 31 de Outubro a correlação das cargas térmicas das diversas zonas do edifício é superior a 85%. Se exceptuarmos a zona 2, a correlação é sempre superior a 95%. Esta realidade é particularmente favorável à utilização de sistemas com acoplamentos, dado que o funcionamento a cargas parciais será simplesmente proporcional ao funcionamento nas condições de projecto.

Se considerarmos todo o ano, a correlação cruzada das cargas sensíveis entre as diversas zonas desce para 74%. Ou seja, será previsível que as falhas dos sistemas referidos ocorram predominantemente no período de 1 de Novembro a 31 de Março, período em que ocorrem cargas de aquecimento e de arrefecimento.

Sendo as cargas adaptadas aos sistemas considerados, a existência de falhas no seu funcionamento reveste-se de maior significado. Na presente secção, identifica-se algumas das situações de falhas consideradas mais relevantes, assim como as suas consequências no comportamento dos sistemas. Em particular, ilustra-se as situações que têm reflexos na temperatura operativa interior e na taxa de ventilação.

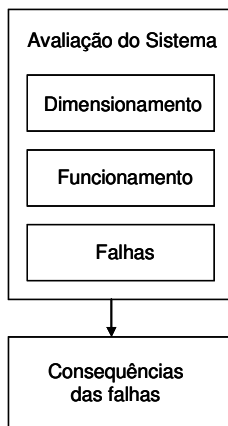
Muito embora fosse interessante avaliar todas as situações de acoplamentos descritas, deixamo-las para apreciações futuras, avaliando-se apenas aquelas que são consideradas mais importantes. Assim, serão tidas em atenção as consequências dos acoplamentos na entrega de ar novo, no sistema VAV, e as consequências na temperatura interior quando são utilizados sistemas com unidades de indução ou com tectos arrefecidos.

O sistema VAV apresenta acoplamentos que podem comprometer a qualidade do ar interior, dado que o ar novo insuflado em cada zona depende não só da sua carga térmica, mas também da de todas as restantes zonas. Já o sistema com unidades de indução utiliza

o ar novo arrefecido como veículo de remoção da carga interna. Esta característica obriga a fixar o ar novo necessário à indução em cada máquina, que vindo frio poderá remover ocasionalmente uma carga térmica excessiva em alguns espaços. Tal situação ocorre igualmente nos sistemas com tectos arrefecidos se o ar novo for utilizado para promover o arrefecimento. O sistema com ventiloconvectores não apresenta falhas em termos de conforto ou de qualidade do ar.

Para o efeito, desenvolveu-se os programas de simulação de cada sistema, que permitem avaliar as situações de falhas e as suas consequências. Qualquer um dos programas segue a estrutura apresentada na Figura 7.6.

O programa, “Avaliação do Sistema”, inicia-se com o módulo de pré-dimensionamento



do sistema em condições de projecto. Neste módulo, determina-se os caudais máximos, número de unidades e outras características gerais dos sistemas. O módulo Funcionamento.m simula a actividade do sistema em cada hora, em função das condições variáveis ao longo do ano. Assume-se em cada hora condições estacionárias no funcionamento do sistema. Finalmente, o programa Falhas.m identifica as situações em que os parâmetros escolhidos tomam valores fora dos intervalos de projecto.

Figura 7.6. Processamento

Para efeitos desta análise, considera-se que existem falhas se a temperatura interior estiver fora do intervalo de 20 °C a 24 °C, ou se o caudal de ar novo entregue na zona ocupada for inferior a 35 m³/(h·ps). Como foi anteriormente referido, no programa de simulação dinâmica de cargas térmicas considerou-se uma banda morta de actuação do sistema de arrefecimento e de aquecimento, no intervalo de temperaturas referido.

Para avaliação das consequências em termos de conforto térmico, desenvolveu-se um programa adaptado a cada um dos sistemas, que calcula o índice VMP e, posteriormente, usando a equação (3.18), determina o índice PPI.

Admite-se condições típicas de permanência em escritórios, nomeadamente: metabolismo de 1,2 met, velocidade residual do ar de 0,2 m/s, humidade relativa na gama de conforto com valores próximos de 50%, e vestuário de Verão e de Inverno de 0,5 e 1,0 clo respectivamente.

No programa de cálculo do VMP as pessoas usam vestuário conducente a 0,5 clo no período de 1 de Abril a 31 de Outubro, correspondente ao período de Verão, e de 1,0 clo na restante parte do ano. A cada hora, a temperatura na superfície do vestuário das pessoas é calculada de modo iterativo com o coeficiente de convecção. Posteriormente, são calculados

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

hora a hora os calores de difusão de vapor, transpiração, respiração sensível e latentes, convecção e radiação, que permitem determinar o índice VMP (equação 3.17).

É ainda interessante agregar as situações de conforto com base nas classes A, B ou C de conforto da ISO 7730, expostas no capítulo 3, de acordo com o preconizado pela EN 15251. Um módulo auxiliar determina o número de pessoas que a cada hora se encontra em cada uma das classes, determinando também a percentagem de pessoas-hora em cada uma das classes referidas. Quantifica-se o conforto pelo valor esperado de pessoas previsivelmente insatisfeitas com o conforto térmico, pelo produto do índice PPI (Equação 3.18) pelas pessoas presentes em cada zona. O somatório anual destes valores é outra medida do conforto.

Avalia-se depois o edifício em termos da qualidade do ar interior. A QAI pode ser estimada por via dos caudais de ar novo entregues em cada momento a cada zona. Pressupõe-se que um caudal superior a $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$, entregue na zona ocupada, não causa desconforto, mas que um caudal inferior irá afectar a QAI. Analisa-se, ainda, a qualidade do ar em função da concentração de CO_2 em cada espaço e obtém-se o máximo de concentração nos espaços. Para o efeito, desenvolveu-se programas adaptados a cada sistema, os quais integram a equação diferencial (3.24) com as condições de cada zona a cada hora. Estes programas consideram uma concentração exterior de CO_2 constante de 350 ppm, uma libertação de CO_2 de $19 \text{ l}/(\text{h}\cdot\text{ps})$ e a eficácia de ventilação. Nestas condições, para um caudal de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$, em modo de arrefecimento, a concentração esperada para o interior dos espaços é de 890 ppm.

Utilizou-se 0,8 para a eficácia da ventilação caso exista carga de aquecimento na zona e 1,0 nos restantes casos. Assim, assumiu-se um caudal de insuflação de $45 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ como solução de referência, que corresponde, nas situações de aquecimento, a um caudal de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ na zona ocupada. Nos períodos sem caudal de insuflação, que ocorrem quando o sistema está parado, admite-se um caudal de infiltração de ar exterior correspondente a 0,3 renovações por hora do volume das zonas.

Com o método de Runge-Kutta de quarta ordem integrou-se a equação diferencial referida ao longo de um ano típico, na qual o número de pessoas e a eficácia de ventilação variam a cada passo. Em alguns sistemas, pode ainda variar o caudal de ar novo e a concentração de insuflação. A concentração obtida refere-se, assim, à zona ocupada. O passo de integração utilizado em cada iteração foi de 0,25 h, com condições iniciais de concentração de CO_2 iguais à concentração exterior em todas as zonas.

Avalia-se também a percentagem de insatisfeitos com a concentração de CO_2 (Equação 3.32). Deste modo, é possível determinar o valor esperado de pessoas insatisfeitas com a concentração de CO_2 , por zona, a cada hora, e o seu somatório.

Nas secções seguintes descreve-se os resultados obtidos, adaptando-se cada um dos programas aos sistemas abordados. São ainda consideradas algumas variantes possíveis aos sistemas, que mitigam, ou eliminam no caso em estudo, as falhas identificadas.

7.3.1 Identificação de falhas do sistema VAV

O programa de avaliação do funcionamento do sistema VAV considera as possibilidades de utilização de sistemas com variação da temperatura de insuflação e com variação do caudal de ar novo.

Nos sistemas com temperatura de insuflação fixa (Sistema 1), cada caixa VAV adapta a posição do seu registo às necessidades da carga da sua zona. O programa prevê que nos sistemas com temperatura de insuflação variável (Sistema 2), em cada momento, pelo menos uma caixa VAV tenha o registo todo aberto. O programa de avaliação admite as possibilidades de o caudal de ar novo ser fixo, ou variável pela ocupação em cada momento.

Como indicado, a avaliação de falhas do sistema VAV segue a estrutura apresentada na Figura 7.6. Pretende identificar-se as situações em que o caudal de ar novo insuflado em cada zona é insuficiente. Para o efeito, o sub-programa “Dimensionamento” calcula o caudal máximo de ar novo de todo o sistema e de cada zona, em função do número de pessoas. Calcula ainda o caudal máximo de insuflação da UTA e de cada zona, determinados pela carga sensível a remover.

O sub-programa “Funcionamento” considera duas possibilidades de funcionamento: com temperatura de insuflação fixa de 16 °C e com temperatura de insuflação ajustada à carga interna. Na primeira hipótese, determina em cada momento o caudal de insuflação para cada zona, de acordo com as suas cargas sensíveis. No entanto, considera um caudal mínimo nas caixas VAV de cada zona, superior ao seu caudal máximo de ar novo e que garanta 30% do caudal máximo de insuflação.

Na segunda hipótese, para além das considerações anteriores, o programa calcula o caudal e a temperatura de insuflação, de acordo com as cargas térmicas de arrefecimento a remover. Para o efeito, faz uma primeira estimativa do caudal para cada zona e a cada hora, considerando a temperatura de insuflação constante. Seguidamente, para o caudal máximo de cada zona, determina a percentagem de abertura dos registos nas caixas VAV. Impõe que em cada momento haja sempre um registo aberto a 100%, adaptando correspondentemente a temperatura de insuflação. A abertura deste registo obriga a reajustar os restantes. Como a alteração da temperatura mudam as posições dos registos das restantes caixas VAV, o ciclo repete-se. A temperatura de insuflação da UTA é determinada pelo mínimo das temperaturas que são necessárias para remover a carga em cada uma das zonas. O processo iterativo pára quando a diferença da temperatura de

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

insuflação, entre iterações, for inferior a $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este processo permite usar uma temperatura de insuflação em modo de arrefecimento tão alta quanto possível.

Finalmente, o sub-programa “Falhas” determina em que momentos e em que zonas o caudal de ar novo imbuído no ar de insuflação é inferior ao necessário. Este caudal é determinado pela aplicação das equações de balanço ao caudal de ar novo de uma instalação, anteriormente apresentadas nas equações (4.1) e (4.2). O ar novo necessário depende do número de pessoas presentes em cada espaço. Cada sistema, 1 ou 2, contempla ainda duas versões de admissão de caudal de ar novo: A) caudal de ar novo fixo determinado pela ocupação máxima; B) caudal de ar novo determinado pela ocupação em cada momento.

Em qualquer dos sistemas, introduz-se o ar novo necessário à totalidade das pessoas. Assim, o sistema A simula a introdução do caudal necessário para a ocupação máxima de 57 pessoas; com o B, o caudal de ar novo é calculado hora a hora em função do número de ocupantes. Quando, numa hora, o caudal de ar novo insuflado for inferior ao caudal de ar novo necessário, as pessoas presentes em cada zona, nessa hora, são contabilizadas como previsivelmente insatisfeitas.

A Figura 7.7 representa o número de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas com o caudal de ar novo. Na coluna da esquerda apresenta-se os gráficos relativos ao sistema VAV com temperatura de insuflação constante, ou sistemas do tipo 1; no da direita, os do sistema com temperatura de insuflação variável, ou do tipo 2. Em cada linha surgem as versões de caudal de ar novo, A e B. Cada gráfico ilustra a introdução do caudal de ar novo de 35 a $50\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$. Verifica-se que a introdução de $35\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ origina um elevado número de pessoas afectadas, mas que a utilização de um caudal de ar novo de $45\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ permite quase eliminar o número de pessoas insatisfeitas. Neste caso, apenas 117 homens·hora são afectados, para o que contribui a eficácia de ventilação quase sempre unitária ao longo do ano.

Os caudais de ar novo insuflado, presentes nos gráficos da figura, dependem das cargas térmicas e, em consequência, dos caudais de insuflação, mas também dos caudais mínimos definidos para cada zona. Estes propiciam em muitas situações uma distribuição mais uniforme dos caudais de ar e, em consequência, dos caudais de ar novo. Verifica-se ainda que a existência de um caudal de ar novo constante garante um maior caudal de ar novo no edifício ao longo do ano.

A zona 3 é a que apresenta maior número de pessoas·hora insatisfeitas, em especial no sistema em que o caudal de ar novo é definido pelo número de pessoas.

Aplicação do Primeiro Axioma

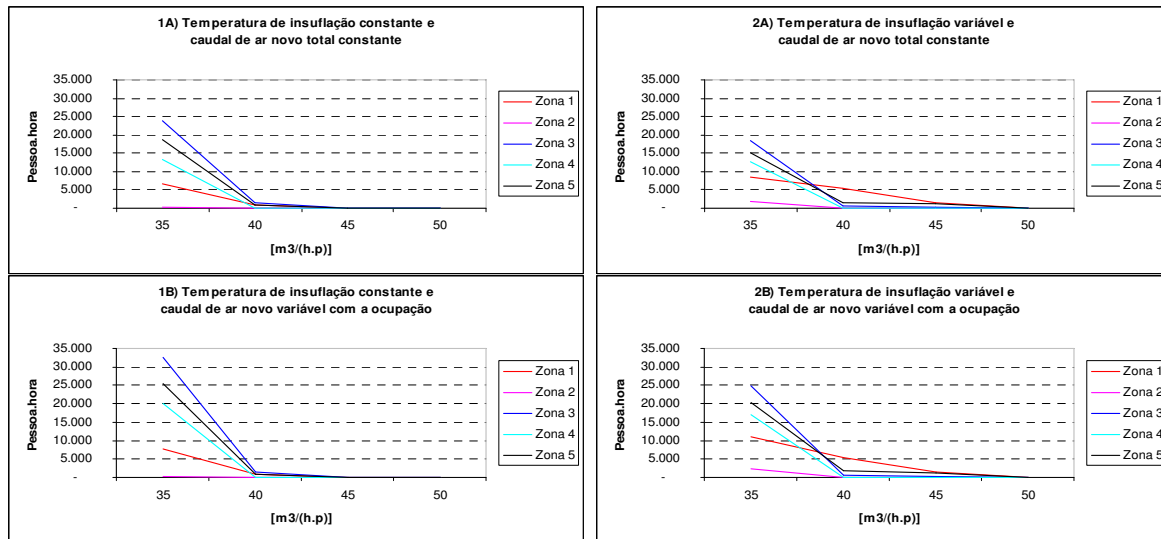


Figura 7.7. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com os sistemas em função do caudal de ar novo introduzido por pessoa

O grau de satisfação das pessoas para com um sistema pode ainda ser fornecido pela razão entre a soma de pessoas-hora em que o sistema cumpre os requisitos funcionais, para o qual foi projectado, e o número de pessoa-hora total de utilização do sistema. Designe-se esta razão por eficiência funcional (EF) [7.2], conceito directamente relacionado com a informação do sistema.

Estimando-se o caudal de ar novo entregue na zona ocupada, a eficiência funcional só é unitária, nos sistemas do tipo 1, se o caudal de ar novo insuflado for superior de 45 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$. Ou seja, só assim se garante que em todos os espaços ocupados exista um caudal de 35 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$. Os sistemas 2 necessitam de um caudal superior a 50 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$. Nestes sistemas, a temperatura de insuflação é mais elevada que nos sistemas 1, pelo que os registos estarão mais abertos. Assim, o caudal de ar novo será distribuído sobretudo em função da carga térmica. Ou seja, paradoxalmente, o aumento da temperatura de insuflação e, em consequência, do caudal de insuflação, obriga a aumentar os caudais de ar novo introduzidos. Na realidade, quando vários registos estão na posição mínima o caudal de insuflação é maior do que as necessidades impostas pela carga térmica, levando consigo maior caudal de ar novo.

A eficiência funcional de cada um dos sistemas é apresentada no quadro seguinte:

EF [%]		1A	1B	2A	2B
Caudal $[\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})]$	35	54,49	37,59	59,04	45,23
	40	97,63	97,63	94,56	94,33
	45	100,00	100,00	97,77	97,77
	50	100,00	100,00	99,97	99,97

Quadro 7.1. Eficiência funcional (EF) dos sistemas VAV em função do caudal de ar novo

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

O sistema A pode ser considerado como mais bem projectado do que o B, dado que tem geralmente maior eficiência funcional. Este facto deve-se à utilização de um caudal de ar novo constante, calculado para 57 pessoas, bastante superior às necessidades dos períodos com ocupação parcial. Nestes períodos, o caudal de retorno à unidade contém ar novo, o que permite que o caudal de ar de insuflação contenha uma elevada percentagem de ar novo.

Esta situação é expressa na Figura 7.8, aplicável ao sistema 2A, em modo de arrefecimento, para o caudal de ar novo insuflado de apenas $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$.

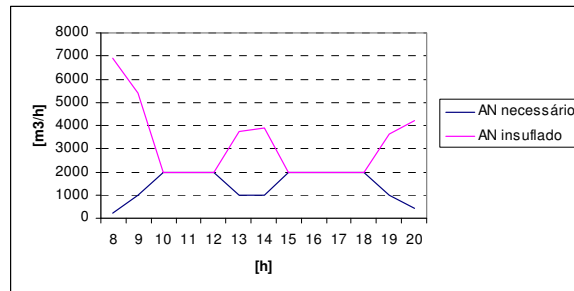


Figura 7.8. Ar novo necessário e insuflado no sistema 2A

Com caudal de ar novo constante, um sistema com recirculação tem nos períodos de menor ocupação (início da manhã, fim da tarde e período de almoço), uma maior percentagem de ar novo no retorno. A mistura com o caudal de ar exterior gera uma percentagem ainda maior de ar novo na insuflação.

Se o caudal depender do número de pessoas presentes nos espaços, as variações do caudal de ar novo serão predominantemente dependentes da carga térmica. Este caudal pode ser definido pela hora do dia, indirectamente pela concentração de CO_2 , ou ainda por sistemas que quantifiquem o número de pessoas. Estes sistemas utilizam normalmente o registo electrónico de entrada das pessoas ou sinais de identificadores pessoais.

Na Figura 7.9 ilustra-se, para o presente exemplo, a variação do caudal de ar novo do sistema 2B ao longo de um dia de Janeiro. De modo a facilitar a comparação, utilizou-se a situação em que o caudal de ar novo insuflado é de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$, igual ao caudal de ar novo necessário. A figura do lado esquerdo apresenta o caudal de ar novo necessário em cada momento, igual em qualquer dia de trabalho. A do lado direito espelha as variações do caudal de ar novo insuflado em cada zona. De notar que a soma dos caudais é igual à da figura da esquerda. Verifica-se que a maior carga da zona 4, com envidraçados a sul e a nascente determina um maior caudal de ar novo ao início da manhã. Durante a tarde, o aumento da carga na zona 5 e 3 determina algum reequilíbrio do caudal para a zona 4.

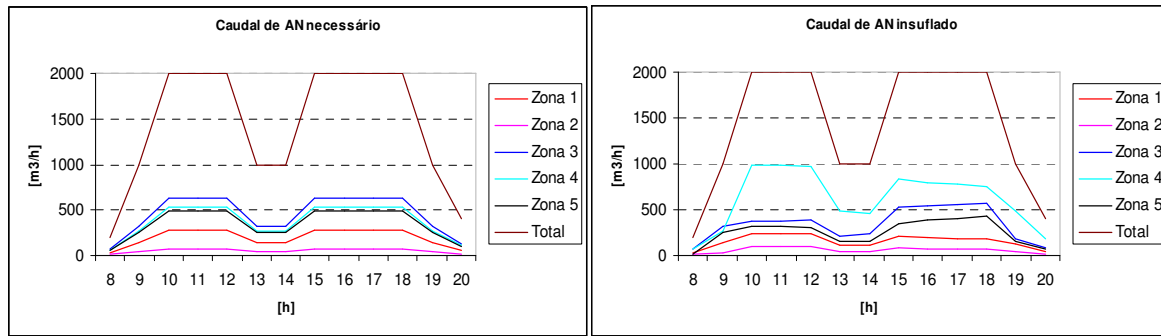


Figura 7.9. Ar novo necessário e insuflado no sistema 2B ao longo de um dia de Janeiro

Com vista à determinação da concentração de CO_2 no caudal de insuflação, aplicou-se a Equação 4.2 determinando-se o conteúdo de ar exterior, Z , no ar primário. Utilizou-se ainda a concentração de CO_2 de 350 ppm na parcela de ar exterior e a concentração de equilíbrio no caudal recirculado.

A concentração máxima de CO_2 é obtida nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, período em que as diferenças de cargas térmicas entre as zonas determinam maiores variações de caudais de insuflação. A Figura 7.10 retrata a concentração de CO_2 nas diversas zonas, para o sistema 2B, quando o caudal insuflado pela UTA corresponde a $45 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{ps})$. A figura é referente a duas semanas e ilustra a dependência da concentração de CO_2 de cada zona, em função das condições de operação das restantes.

Neste exemplo, a concentração máxima de CO_2 ao longo de todo o ano ocorre na zona 5 com 938 ppm. Note-se que este valor não é crítico para a permanência de pessoas, mas é superior ao que se obteria para o caudal de ar novo constante indicado. Há, portanto, que discutir se os critérios de aceitação de sistemas se baseiam na garantia de entrega de um determinado caudal de ar novo ou em limiares de concentração de poluentes. Na realidade, os efeitos conjugados da inércia do volume de ar, a ventilação nocturna por infiltração e a diversidade de ocupação dos espaços permitem que a concentração interior de CO_2 se encontre a níveis aceitáveis, malgrado o caudal de ar novo entregue seja inferior ao projectado.

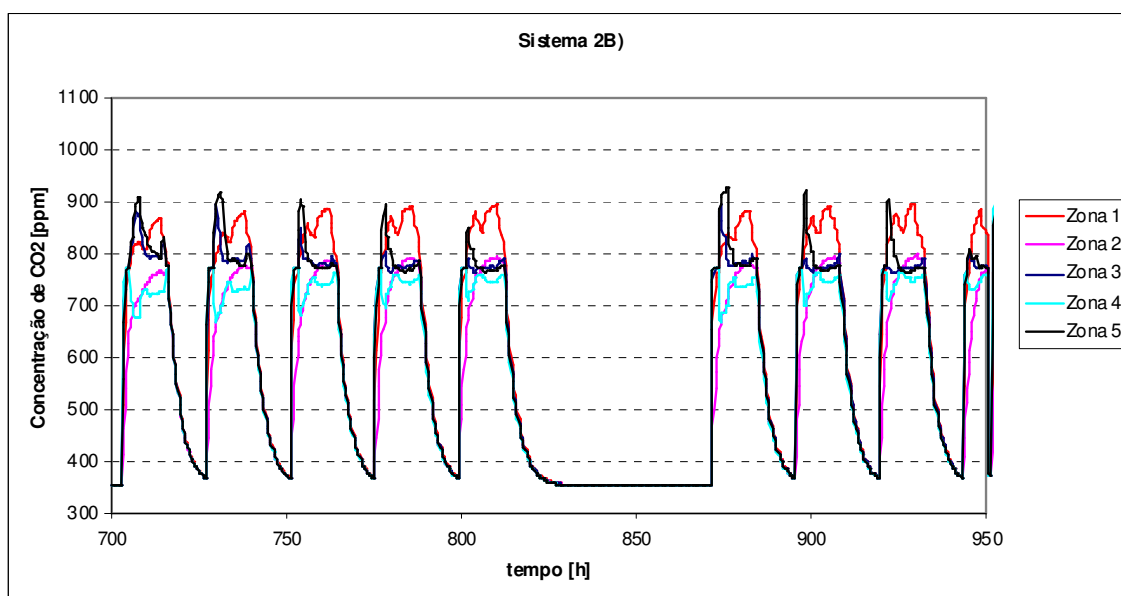


Figura 7.10. Concentração de CO₂ entre as 700 e as 950 h de funcionamento do sistema VAV, 2B, com um caudal de ar novo de 45 m³/(h·ps)

Mantendo a condição de uma caudal de ar novo de 45 m³/(h·ps), obteve-se os valores de concentração máxima de CO₂ ocorridos para os diversos sistemas, calculados pelo método não estacionário descrito.

CO ₂ [ppm]	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
1A	843	777	849	815	853
1B	854	790	859	827	863
2A	892	796	912	801	938
2B	903	814	923	803	938

Quadro 7.2. Concentração máxima de CO₂ em ppm, por zona, para os sistemas VAV quando o caudal de ar novo é de 45 m³/(h·ps)

Pode ainda determinar-se a percentagem de pessoas insatisfeitas a cada hora com a concentração de CO₂. No quadro seguinte indica-se o acumulado desse valor, que constitui mais um indicador para a comparação deste sistema com os outros apresentados.

Sistema	1A	1B	2A	2B
Total de pessoas·hora insatisfeitas	16.743	19.262	16.852	19.389

Quadro 7.3. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO₂ nos sistemas VAV

Os quadros anteriores mostram que aos sistemas B correspondem um maior número de insatisfeitos e, geralmente, uma maior concentração máxima.

Muito embora os sistemas VAV controlem a temperatura interior no intervalo definido entre os 20 °C e os 24 °C, quando o registo estiver na posição mínima o ar insuflado frio pode provocar desconforto. Os espaços onde esta situação ocorrer terão necessidade de

reaquecimento terminal. Este problema é resolvido, em algumas implementações do sistema, com uma bateria de reaquecimento nas caixas VAV, implicando um aumento do consumo de energia do sistema.

Assumiu-se que se a carga do ar novo, calculada à temperatura de 20 °C, for superior à carga sensível do espaço a temperatura do espaço passará a ser de 20 °C. Nos restantes casos a temperatura permanecerá a calculada para o espaço. Deste modo, o perfil de temperaturas previsto para o espaço será alterado deslocando-se no sentido do limite inferior do intervalo de conforto.

A alteração ao perfil depende da temperatura de insuflação e, portanto, do tipo de sistema considerado para esse efeito. Na presente análise, considera-se a possibilidade do sistema ter temperatura de insuflação constante (sistema VAV1), ou em alternativa poder ser variável (sistema VAV2). Se no primeiro caso, a temperatura de insuflação é mantida sempre a 16 °C, no segundo, as condições de funcionamento ditaram que a mesma variasse entre os 16 °C e os 23,5 °C.

É assim possível determinar a distribuição por classes de conforto dos sistemas VAV 1 e VAV 2, de acordo com as classes da ISO 7730. As três classes desta norma, A, B e C são expressas no Quadro 7.4, sendo a percentagem de cada classe determinada em função do número de pessoas·hora sujeitas às condições respectivas. Criou-se ainda uma classe D que reúne os períodos em que as condições de conforto não pertencem a quaisquer das outras classes.

		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Sistema VAV1	Classe A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Classe B	11,1	0,9	37,1	39,4	34,7
	Classe C	85,9	90,4	62,2	59,9	64,1
	Classe D	3,0	8,7	0,7	0,6	1,1
Sistema VAV2	Classe A	8,9	10,2	1,0	0,4	1,6
	Classe B	20,4	5,4	40,6	41,2	39,9
	Classe C	70,0	79,1	58,4	58,3	58,3
	Classe D	0,8	5,3	0,1	0,1	0,2

Quadro 7.4. Percentagem de pessoas·hora em cada classe de conforto por zona nos sistemas VAV1 e VAV2

Em ambos os sistemas, as pessoas permanecem sobretudo nas condições da classe C. No entanto, o sistema com variação da temperatura de insuflação permite que haja um maior número de pessoas nas classes A e B. Esta situação implica que o número de insatisfeitos com o sistema 2 seja menor que o do sistema 1. Apresenta-se no quadro seguinte o valor esperado de pessoas insatisfeitas com as condições de conforto de ambos os sistemas. O valor esperado de insatisfeitos é determinado pelo somatório ao longo do ano dos produtos do índice PPI pelo número de pessoas presentes nos espaços em cada hora.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Pessoas-hora insatisfeitas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Sistema VAV1	2.319	749	4.336	3.578	3.475	14.458
Sistema VAV2	1.885	601	4.095	3.425	3.182	13.189

Quadro 7.5. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto dos sistemas VAV1 e VAV2

7.3.2 Identificação de falhas do sistema com ventiloconvectores

Como referido anteriormente, o sistema com ventiloconvectores é independente. Deste modo, pode variar-se a temperatura sem alterar o caudal de ar novo, já que este caudal não varia com a carga térmica. Assim, como o caudal de ar novo de referência de $45 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ garante a entrega de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ na zona ocupada, a eficiência funcional do sistema em termos de entrega do caudal de ar é unitária. De notar que face à pequena permanência do sistema em modo de aquecimento, apenas no início da manhã nos períodos de Inverno, a eficiência funcional com um caudal de ar novo de referência de $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ seria já de 99,9%.

Por outro lado, como o sistema permite garantir independentemente o aquecimento ou o arrefecimento, a sua eficiência funcional relativa ao conforto será igualmente unitária, desde que os equipamentos instalados cumpram o perfil de temperatura estimado para o ambiente interior. O perfil inicialmente previsto é ligeiramente alterado pela introdução de ar novo a uma temperatura fixada. Para avaliar as consequências desta situação, modelou-se o comportamento do sistema para uma temperatura de insuflação do ar novo de 22°C com duas hipóteses de determinação do caudal de admissão do ar novo: o ar novo é constante e determinado pelo máximo de ocupação (sistema A); o ar novo é variável função da ocupação (sistema B). A média das diferenças entre os perfis de temperatura, no período de ocupação, é inferior em qualquer dos casos a $0,2^\circ\text{C}$.

Para existir um termo de comparação com os outros sistemas, é interessante analisar o conforto e a qualidade do ar esperados pela utilização deste sistema. Um dos indicadores utilizados na secção anterior foi a percentagem de pessoas-hora por classe de conforto. Aplicando o programa utilizado ao presente sistema, com os mesmos considerandos, obteve-se os resultados a seguir apresentados.

		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Sistema A	Classe A	24,5	39,0	2,6	0,8	3,5
	Classe B	17,1	2,6	38,9	40,8	38,0
	Classe C	57,1	53,0	58,2	58,1	57,9
	Classe D	1,4	5,5	0,3	0,3	0,6
Sistema B	Classe A	23,5	38,4	2,1	0,5	3,3
	Classe B	18,1	3,1	39,5	41,0	38,3
	Classe C	57,3	53,3	58,3	58,3	58,2
	Classe D	1,2	5,1	0,2	0,2	0,3

Quadro 7.6. Percentagem de pessoas-hora em cada classe de conforto por zona nos sistemas com VC do tipo A e B

Aplicação do Primeiro Axioma

Com base nos pressupostos anteriores, este sistema gera condições de conforto maioritariamente na classe C, muito embora as classes A e B representem cerca de 40% em todas as zonas. Não existem diferenças significativas entre os perfis de temperatura de cada um dos dois sistemas avaliados.

É também importante obter o número de pessoas previsivelmente insatisfeitas em cada zona. Utilizando o índice PPI, obteve-se o somatório do valor esperado de insatisfeitos de cada hora. O somatório anual é então de:

Pessoa-hora insatisfeitas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Sistema A	1.727	455	4.098	3.437	3.192	12.908
Sistema B	1.717	444	4.090	3.425	3.174	12.850

Quadro 7.7. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com um sistema com VC

Relativamente à qualidade do ar interior, simulou-se a concentração de CO₂ com uma versão alterada do programa descrito para o sistema VAV. Nesta versão, o programa contempla a distribuição do ar a partir de uma UTAN, pelo que, consequentemente, não possui ar recirculado. A figura seguinte mostra a evolução da concentração de CO₂ ao longo de uma semana de funcionamento do sistema com ventiloconvectores, para o caso da versão B.

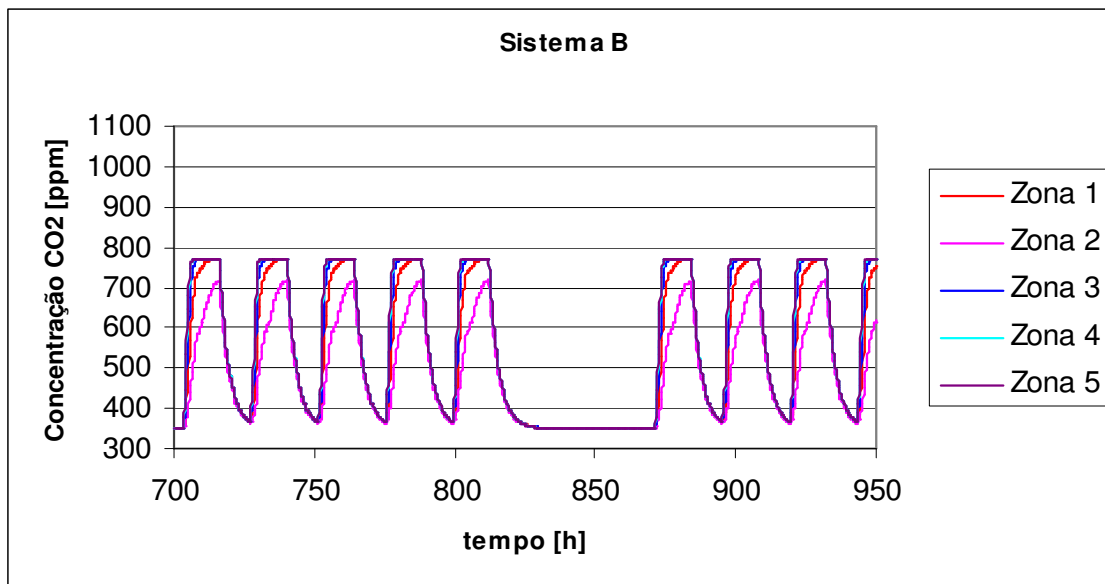


Figura 7.11. Concentração de CO₂ entre as 700 e as 950 h de funcionamento do sistema VC, B, com um caudal de ar novo de 45 m³/(h·ps)

As concentrações máximas obtidas em cada zona para ambas as variantes, A e B, de sistemas são apresentadas no quadro seguinte:

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
A	760	688	771	772	772
B	771	717	772	772	772

Quadro 7.8. Concentração máxima de CO₂ por zona para os sistemas com VC

Estas concentrações são inferiores à concentração de 890 ppm, prevista para condições estacionárias com um caudal de ar novo na zona ocupada de 35 m³/(h·ps). Correndo de novo o programa para um caudal de ar novo admitido na UTAN de 35 m³/(h·ps), a concentração máxima obtida ao longo do ano, para ambos os sistemas, é de 893 ppm. Ou seja, apenas 3 ppm acima do valor previsto para condições estacionárias. Esta constatação permite colocar em dúvida a real necessidade de se considerar a eficácia de ventilação, quando se pretende definir o caudal de ar insuflado em sistemas que funcionem preponderantemente em modo de arrefecimento.

De modo semelhante ao efectuado na secção anterior, determinou-se a cada hora e em cada zona a percentagem de insatisfeitos com a concentração de CO₂. Com base nestes valores, calculou-se o número de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas. O acumulado anual destes valores é apresentado no quadro seguinte:

Sistema	Total de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas
A	16.195
B	18.233

Quadro 7.9. Pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO₂ nos sistemas com VC

7.3.3 Identificação de falhas do sistema com tectos arrefecidos

Para analisar o comportamento de sistemas com tectos arrefecidos, considera-se a possibilidade da temperatura de insuflação ser de 22 °C, ou ser variável com a carga interna. Estes sistemas são designados respectivamente por sistema 1 e 2. Em qualquer dos casos indicados, corrige-se a temperatura interior com a carga introduzida pelo ar novo. No caso do sistema 1 o sistema pode ser considerado independente. No outro sistema, o ar novo remove parte da carga térmica sendo geralmente insuflado a uma temperatura inferior à ambiente, variável com a carga dos espaços. Viu-se que este sistema seria acoplado.

Admite-se, em qualquer dos casos, que os tectos arrefecidos ocupam 60% da área dos tectos, estando os painéis a uma temperatura média de 17 °C. O caudal de ar novo é determinado pela ocupação máxima, com um caudal de ar novo por pessoa de 45 m³/(h·ps), escolha que permite comparar os resultados obtidos com os dos outros sistemas analisados.

No caso do sistema com temperatura do ar novo variável, impõe-se uma temperatura mínima do ar de 16 °C. A cada instante determina-se, em cada zona, a temperatura de

insuflação necessária para remover a carga que excede a potência dos tectos arrefecidos. A temperatura de insuflação do ar novo é determinada pelo valor mínimo destas temperaturas.

De notar que esta solução tem uma implementação física difícil, uma vez que obriga a estimar a carga térmica de cada espaço. Esta estimativa teria de ser realizada por um sistema autónomo, pelo que a decomposição funcional deste sistema seria diferente daquela que foi expressa na Figura 7.4. Constitui, no entanto, uma linha possível para evolução deste sistema.

Uma nova temperatura interior é calculada sempre que a carga removida pelo ar novo excede a carga térmica de um espaço. Nas situações em que esta temperatura é externa à gama de conforto, definida entre 20 °C e 24 °C, são contabilizadas as pessoas afectadas.

Tal como nas secções anteriores, determina-se os índices VMP e PPI. Para o cálculo da temperatura radiante média, assumiu-se que a temperatura das paredes seria igual à temperatura do ar. Esta hipótese pode ser utilizada se as variações da temperatura interior forem pequenas.

Para o cálculo do fluxo de calor dos tectos, considera-se um coeficiente de convecção para fluxo descendente de 8,3 W/(m²·K). Determinou-se a temperatura radiante média para pessoas sentadas, aplicando a expressão (3.6).

Nos quadros seguintes apresenta-se a eficiência funcional, a percentagem de pessoas-hora nas classes de conforto da ISO 7730 e o número de insatisfeitos. O Quadro 7.10 apresenta a eficiência funcional, resultado da relação entre as pessoas-hora afectadas pelo mau funcionamento do sistema e o número total de pessoas-hora ao longo do ano:

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Sistema 1	1,00	0,99	0,98	0,50	0,48	0,73
Sistema 2	1,00	0,99	0,98	0,91	0,75	0,91

Quadro 7.10. Eficiência funcional (EF) relativamente ao conforto térmico nos sistemas com tectos arrefecidos

O sistema 2, permitindo a variação da temperatura de insuflação até aos 16 °C, remove em diversas situações as cargas mais elevadas das zonas 4 e 5. Mesmo assim, o sistema 2 não consegue responder sempre às cargas térmicas, tendo uma EF de 91%. O sistema 1, ao insuflar o ar novo numa condição que não afecta o conforto, não consegue remover a totalidade da carga interna. Tem, assim, uma eficiência funcional inferior, a que corresponde, neste caso, um perfil de temperaturas com média superior a 24 °C.

Pode igualmente calcular-se a percentagem de pessoas-hora por classe de conforto. De modo semelhante àquele que foi apresentado anteriormente, o quadro seguinte indica os resultados pretendidos, para cada versão do sistema:

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

	Classes	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Sistema 1	Classe A	24,6	39,0	2,7	9,4	8,9
	Classe B	16,9	2,3	38,8	49,7	43,0
	Classe C	57,1	52,9	58,2	21,7	16,5
	Classe D	1,5	5,8	0,3	19,2	31,7
Sistema 2	Classe A	19,7	30,7	1,1	2,4	6,0
	Classe B	21,7	10,5	40,3	45,5	46,8
	Classe C	57,5	53,8	58,2	51,8	37,7
	Classe D	1,0	5,1	0,3	0,2	9,5

Quadro 7.11. Percentagem de pessoas-hora em cada classe de conforto por zona, nos sistemas com tectos arrefecidos

No sistema 1, as zonas 4 e 5, com maiores cargas internas, apresentam percentagens elevadas de pessoas-hora na classe D de conforto. Esta situação quase desaparece se a temperatura de insuflação for de 16 °C. Neste sistema, ocorrem por diversas vezes temperaturas interiores abaixo do limite inferior de conforto. Na totalidade, contabiliza-se estas horas em cerca de 1.500.

Finalmente, com base no índice PPI estimou-se as pessoas previsivelmente insatisfeitas em cada zona. O total de pessoas insatisfeitas permite dizer que o sistema 2 deve ser considerado como linha de evolução. O resultado é apresentado no quadro seguinte:

Pessoas-hora insatisfeitas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Sistema 1	1.892	508	4.379	5.257	9.587	21.622
Sistema 2	1.880	497	4.391	3.546	3.931	14.245

Quadro 7.12. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com um sistema com tectos arrefecidos

Utilizando o programa de cálculo das concentrações de CO₂ para sistemas com UTAN, determinou-se as concentrações máximas em cada zona. Os resultados são os mesmos para ambos os sistemas, porque o caudal de ar novo introduzido é igual. A menor concentração na zona 2 deve-se à menor ocupação deste espaço. Os resultados são apresentados no Quadro 7.13.

Sistema	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
1 e 2	760	688	771	772	772

Quadro 7.13. Concentração máxima de CO₂ por zona para os sistemas com tectos arrefecidos

De modo equivalente ao efectuado na secção anterior, determinou-se ainda a cada hora e em cada zona a percentagem de insatisfeitos com a concentração de CO₂ e, com estes valores, o número de pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas. O acumulado anual é apresentado no quadro seguinte:

Sistema	Total de pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas
1 e 2	16.195

Quadro 7.14. Pessoas-hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO₂ nos sistemas com tectos arrefecidos

7.3.4 Identificação de falhas do sistema com unidades de indução

O programa de avaliação do funcionamento de sistemas com unidades de indução (UI) utilizou como referência unidades com uma potência de cerca de 700 W, dos quais 240 W são devidos à introdução de ar primário a 16 °C. A potência refere-se a condições interiores de 24 °C, para um regime de temperaturas da água na bateria de 14-17 °C. Determina-se o caudal de ar primário pelas necessidades de indução nas unidades e pelas necessidades mínimas de ar novo. No caso presente, o caudal de ar primário é cerca de 47% superior ao caudal de ar novo necessário, determinado à taxa por pessoa de 45 m³/h.

Na avaliação, considerou-se dois sistemas: o sistema mais comum, em que o ar primário é insuflado frio, ou sistema 1; e o sistema 2, em que as UI têm uma bateria de água quente, que permite reaquecer o ar sempre que necessário.

Em algumas situações, a carga removida pelo ar novo é superior à carga interna da zona. Nestas situações, é determinada uma nova temperatura interior do espaço, que pode não corresponder à gama de conforto considerada. No sistema 2, este desequilíbrio é compensado pela carga de reaquecimento introduzida na bateria respectiva, com uma potência máxima de 740 W, determinada para condições interiores de 20 °C, num regime de temperaturas da água na bateria de 45-40 °C.

Relativamente ao conforto, o sistema 2 tem eficiência funcional unitária, conforme apresentado no quadro seguinte. Com um sistema auxiliar de reaquecimento, é possível remover os efeitos nefastos do acoplamento entre as necessidades de indução e de remoção de carga. Este tipo de solução é comum em sistemas de climatização, implicando, no entanto, que existam equipamentos complementares com funcionamento oposto ao do sistema.

Pessoas-hora	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Sistema 1	0,64	0,49	0,93	0,96	0,91	0,87
Sistema 2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Quadro 7.15. Eficiência funcional (EF) relativamente ao conforto nos sistemas com unidades de indução

No sistema 1, atinge-se em todas as zonas temperaturas inferiores ao limiar mínimo de conforto, situações que ocorrem em cerca de 4.600 horas nas diversas zonas ao longo do ano.

O cálculo hora a hora dos índices VMP permite obter a percentagem de pessoas-hora por classe de conforto, que é indicada no quadro seguinte:

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Sistema 1	Classe A	3,0	0,0	3,7	0,8	4,7
	Classe B	5,6	0,4	32,5	38,5	28,8
	Classe C	50,9	45,0	57,6	57,3	56,8
	Classe D	40,5	54,5	6,2	3,4	9,6
Sistema 2	Classe A	3,0	0,0	3,7	0,7	4,7
	Classe B	5,5	0,4	32,4	38,4	28,7
	Classe C	81,3	83,4	62,0	59,2	63,4
	Classe D	10,2	16,1	1,9	1,6	3,2

Quadro 7.16. Percentagem de pessoas·hora em cada classe de conforto por zona, nos sistemas com unidades de indução

Utilizando o índice PPI pode calcular-se o somatório do valor esperado, hora a hora, das pessoas previsivelmente insatisfeitas em cada zona. Os resultados são apresentados no quadro seguinte:

Pessoas·hora insatisfeitas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Sistema 1	4.879	1.696	5.038	3.893	4.292	19.797
Sistema 2	2.744	851	4.422	3.668	3.594	15.278

Quadro 7.17. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com um sistema com unidades de indução

Os resultados em termos de qualidade do ar interior são iguais em ambos os sistemas, por usarem o mesmo caudal de ar novo. Como estes sistemas necessitam de um elevado caudal de ar primário, as concentrações interiores de CO₂ são necessariamente baixas. Os máximos obtidos em cada zona são apresentados no quadro seguinte:

Sistema	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
1 e 2	561	487	667	702	646

Quadro 7.18. Concentração máxima de CO₂ por zona para os sistemas com unidades de indução

De modo equivalente ao efectuado na secção anterior, determinou-se a cada hora e em cada zona a percentagem de insatisfeitos com a concentração de CO₂. Com estes valores calculou-se o número de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas.

	Total de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas
Sistema 1 e 2	12.143

Quadro 7.19. Pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO₂ nos sistemas com unidades de indução

7.4 Avaliação do Consumo de Energia

Considere-se de novo o edifício 1, bem como as suas cargas horárias, e utilizando cada um dos sistemas de climatização referidos analise-se o consumo de energia correspondente. Nesta avaliação despreza-se as variações nas cargas térmicas do edifício, que ocorreriam quando a temperatura interior fosse alterada relativamente ao perfil de temperaturas obtido.

Em rigor, a cada sistema de climatização corresponderão temperaturas interiores dos espaços e das paredes ligeiramente diferentes, que originarão cargas térmicas interiores ligeiramente diferentes.

Usando o programa apresentado no capítulo sexto, adaptado ao funcionamento de cada um dos sistemas, avalia-se então os seus consumos de energia. Esta secção segue de perto um artigo por nós enviado e aceite para o 37º IAHS [7.3].

Não é pretensão deste capítulo fazer a análise multi-variada dos diversos sistemas de climatização, tal como efectuado no capítulo sexto com o sistema de ventiloconvectores. Dado que as conclusões obtidas nesse capítulo são adaptáveis a cada um dos sistemas agora considerados, utilizar-se-á como base uma combinação de parâmetros de acordo com os resultados do Quadro 6.9. Esta combinação será adaptada de modo a garantir o funcionamento de cada um dos sistemas examinados. Admite-se, no entanto, a existência de recuperação dado ser de uma realidade do mercado.

No Quadro 7.20 apresenta-se as variáveis, que foram tomadas fixas, para qualquer das simulações dos diversos sistemas. As variáveis de controlo do caudal variável no ventilador, *cvv*, e da temperatura no evaporador, *tev*, assumem valores diferentes em função dos sistemas. Nas situações em que haja variação de caudal no ventilador utilizar-se-á *dpmv* na situação de menor consumo de energia. O mesmo tipo de controlo será utilizado na rede de água fria e quente, que será igualmente de caudal variável. Em especial, as UTA ou UTAN terão baixa perda de carga (*dpmv*=1).

	<i>cvv</i>	<i>cvb</i>	<i>rc</i>	<i>eff</i>	<i>dpmv</i>	<i>dpmb</i>	<i>clf</i>	<i>qcv</i>	<i>qcb</i>	<i>tev</i>	<i>eer</i>	<i>rch</i>	<i>ccpch</i>	<i>dtM</i>	<i>isl</i>
Estado	---	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	---	+1	-0,6	-1	-1	-1

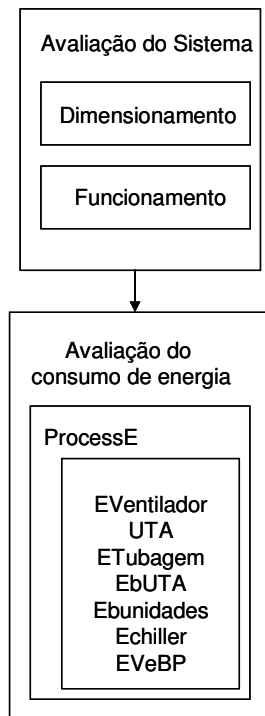
Quadro 7.20. Estados das variáveis de controlo

Os motores serão de classe EFF1 e a classe de fugas e o isolamento típicos destas utilizações (*clf*= -1 e *isl*= -1). Os GPFC serão do tipo *scroll*, com EER melhorado e com recuperação parcial.

Algumas das variáveis terão significados diferentes consoante as aplicações. Assim, nas simulações de tectos arrefecidos e de unidades de indução, as variáveis *tev* e *dtM* serão associadas aos valores correspondentes para estes sistemas.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Avaliou-se o consumo de energia em cada sistema ligando o processamento relativo ao dimensionamento e funcionamento do sistema (Figura 7.6), com o processamento do consumo de energia (Figura 6.1). O resultado é expresso na figura seguinte.



Do primeiro processamento obteve-se os caudais de ar novo e de insuflação, as temperaturas de insuflação e do ambiente interior, assim como as cargas relativas aos equipamentos interiores. Estas variáveis são a seguir utilizadas no programa de avaliação do consumo de energia, que foi adaptado para cada um dos sistemas considerados. Contém genericamente os módulos associados ao programa ProcessE. Os módulos EVentilador, UTA e ETubagem associados às cargas internas determinam as cargas a remover pelo sistema. Estas cargas são contabilizadas no módulo Echiller, que avalia a energia eléctrica despendida. Outros módulos analisam o consumo eléctrico nos ventiladores da UTA, nas bombas dos circuitos secundários, EbUTA e Ebunidades, e nas bombas do circuito primário EVeBP. Este módulo quantifica também o consumo eléctrico nas unidades terminais, caso exista, e num ventilador de exaustão.

Figura 7.12. Esquema de processamento

A avaliação do consumo de energia em cada um dos sistemas implicou a alteração dos módulos respectivos, de modo a espelharem as suas características. Indicar-se-á nas secções seguintes as alterações realizadas, apresentando-se também os resultados relativos às cargas removidas e ao consumo de energia dos sistemas.

7.4.1 Consumo de energia do sistema VAV

Como referido, o processo de cálculo do consumo de energia inicia-se com a avaliação do funcionamento do sistema, sendo em seguida calculados os consumos nos diversos componentes relevantes do sistema de climatização. Da avaliação do sistema, extraiu-se as variáveis relativas à massa de insuflação, à massa de ar novo, à temperatura de insuflação, à temperatura de retorno à UTA e à carga de reaquecimento nas caixas VAV, calculadas em cada hora de um ano típico. Para além destas variáveis, utilizou-se as cargas térmicas internas obtidas na simulação dinâmica do edifício.

O programa considerou cada um dos quatro sistemas descritos na secção 7.3.1, obtidos das combinações entre as possibilidades de sistemas de controlo da temperatura de insuflação com os sistemas de admissão de ar novo.

Aplicação do Primeiro Axioma

A modelação do sistema considerou as variáveis de controlo nos estados apresentados no Quadro 7.21.

	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
Estado	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	1	1	-1	1	-0,6	-1	-1	-1

Quadro 7.21. Estado das variáveis de controlo para os sistemas VAV

Utilizando-se as variáveis do caudal de ar novo e de insuflação, determinou-se o caudal de extracção, de recirculação e de exaustão. Para o efeito, admite-se uma tiragem do interior do edifício de 550 m³/h provocada por um pequeno ventilador de exaustão e pela exfiltração devida à sobrepressão do edifício, de acordo com o que fora prescrito no projecto.

A determinação das cargas removidas na UTA considera a temperatura de insuflação e a de retorno das salas calculadas no módulo de avaliação do sistema, a existência de um recuperador entre o ar de admissão exterior e o ar de exaustão e uma humidade específica na insuflação de 9 g/kg_{ar seco}.

Redimensionou-se as tubagens de água fria e quente da rede exterior, existindo no interior apenas a rede de água quente. Como expresso no Quadro 7.21, utilizou-se o regime de temperaturas de 7 °C à entrada da UTA e de 12 °C à saída.

Somando as cargas removidas na UTA, com a carga de reaquecimento e com a troca na tubagem, determina-se as cargas térmicas de aquecimento e de arrefecimento necessárias à climatização com o sistema. Estas cargas são utilizadas no programa Echiller para determinar a energia eléctrica consumida.

Corrigiu-se o ar caudal de ar novo insuflado na zona ocupada, usando uma eficácia de ventilação de 0,8. O programa EVentilador determina a energia despendida nos ventiladores de insuflação e de extracção da UTA, determinando ainda o aquecimento provocado no fluxo de ar pelas perdas do conjunto moto-ventilador. Na UTA, considera-se a recuperação de calor entre o ar novo e o ar de exaustão.

É ainda calculada a energia necessária ao funcionamento das bombas de água fria e quente da UTA e das bombas de água quente que alimentam as caixas VAV. Qualquer destas bombas funciona permanentemente de 1 de Novembro a 31 de Março e, no restante período do ano, apenas quando houver necessidade de introdução de carga térmica. Finalmente, considera-se os consumos nas bombas do primário e no ventilador de exaustão. No período do ano correspondente ao arrefecimento, assume-se que as bombas do primário do circuito de aquecimento funcionam, também, apenas quando existem cargas de aquecimento. Estas possibilidades de redução do consumo de energia, por paragem das bombas dos circuitos de aquecimento, são de muito difícil implementação por um sistema de controlo. Muitas vezes é executada pelo gestor do edifício, com base na sua experiência do funcionamento do sistema. No período de arrefecimento, as cargas de reaquecimento

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

ocorrem especialmente no início da manhã, pelo que o gestor do edifício pode dar ordem para elevar a temperatura da rede e dos depósitos de inércia associados no arranque do sistema, permitindo assim que as eventuais necessidades de reaquecimento sejam satisfeitas.

Aplicar-se-á a todos os sistemas simulados os considerandos expressos, relativos ao funcionamento das redes de aquecimento.

Nos quadros seguintes indica-se as cargas removidas e a energia eléctrica consumida nos diversos equipamentos, para as diversas configurações do sistema VAV. As cargas térmicas são divididas em cargas de aquecimento e de arrefecimento e expressas em carga do sistema e carga removida na UTA.

O quadro seguinte expõe os dados obtidos, utilizando-se as siglas “+” e “-” para fazer referência às cargas de aquecimento e de arrefecimento; utiliza-se “QSist” e “QUTA” para expressar as cargas do sistema e as dependentes da unidade de tratamento de ar.

No sistema 2, com a variação da temperatura de insuflação, o caudal médio de insuflação aumenta cerca de 49% relativamente ao sistema com temperatura de insuflação fixa, sistema 1. Este aumento reflecte-se sobretudo na variação da energia consumida nos ventiladores de insuflação e de extracção, tendo o sistema 2 um consumo em ventilação duplo do sistema 1.

À utilização de ar novo variável corresponde um ligeiro aumento da carga de arrefecimento do sistema e uma redução da carga de aquecimento.

Sistema	QSist (-) [W·h]	QSist (+) [W·h]	QUTA (-) [W·h]	QUTA (+) [W·h]
1 A	5,30E+7	6,41E+6	5,12E+7	6,68E+5
2 A	5,36E+7	7,94E+6	5,12E+7	6,68E+5
1 B	5,39E+7	5,96E+6	5,12E+7	6,68E+5
2 B	5,64E+7	3,44E+6	5,12E+7	6,68E+5

Quadro 7.22. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas VAV

As cargas são removidas ou introduzidas na UTA e nas baterias das caixas VAV, integradas num sistema com diversos equipamentos. No Quadro 7.23 indica-se os consumos de energia nos diversos equipamentos que constituem o sistema VAV.

Menciona-se ainda os consumos nos ventiladores de insuflação (V_i), de extracção (V_e) e de exaustão ($+V_e$), nas bombas dos circuitos do primário e do secundário de aquecimento e de arrefecimento (BP+BS) e o consumo em modo de arrefecimento e de aquecimento no GPFC (EAF e EAQ). É ainda apresentado o consumo de energia total do sistema.

Aplicação do Primeiro Axioma

Sistema	Vi [W·h]	Ve [W·h]	+Ve [W·h]	BP+BS [W·h]	EAF [W·h]	EAQ [W·h]	Total [W·h]
1 A	3,87E+6	1,57E+6	1,41E+5	1,93E+6	1,01E+7	1,01E+6	1,86E+7
2 A	7,73E+6	3,27E+6	1,41E+5	2,31E+6	1,03E+7	1,47E+6	2,52E+7
1 B	3,87E+6	1,57E+6	1,41E+5	1,65E+6	1,02E+7	8,25E+5	1,82E+7
2 B	7,73E+6	3,27E+6	1,41E+5	1,68E+6	1,06E+7	3,75E+5	2,38E+7

Quadro 7.23. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas VAV

Dos dados apresentados pode retirar-se algumas conclusões interessantes:

A variação da temperatura de insuflação obriga a aumentar o caudal de insuflação e, conseqüentemente, aumenta o consumo nos ventiladores. Os sistemas que utilizam este mecanismo têm um consumo de energia superior a 30%, relativamente aos sistemas com temperatura de insuflação fixa. A modulação do caudal de ar novo implica ligeiros acréscimos na energia consumida para arrefecimento, mas uma redução na de aquecimento, correspondendo a uma redução do consumo de energia inferior a 5%.

Ou seja, não há grande vantagem em variar o caudal de ar novo e há prejuízo em modular a temperatura de insuflação.

Outras soluções poderão vir a ser analisadas futuramente, tais como: a variação da temperatura da água de arrefecimento em função da temperatura de insuflação; a utilização de arrefecimento gratuito dependente da quantificação da carga térmica de arrefecimento; ou ainda a variação do caudal de água nos circuitos primários. Estas e outras soluções estão fora do âmbito deste trabalho tendo algumas uma implementação tecnológica difícil.

7.4.2 Consumo de energia do sistema com ventiloconvectores

Os sistemas avaliados nesta secção têm as características típicas de um sistema com ventiloconvectores, com temperaturas da rede de água de 7 °C na saída da unidade produtora, de 12 °C no retorno, insuflação do ar novo a 22 °C com 9 g/kg_{ar seco}. Avalia-se os sistemas com caudal de ar novo fixo (sistema A), e variável em função da ocupação (sistema B). As restantes características são equivalentes aos restantes sistemas simulados, de acordo com as variáveis de controlo em seguida apresentadas.

Estado	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
Sistema A	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	1	-0,6	-1	-1	-1
Sistema B	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	1	-0,6	-1	-1	-1

Quadro 7.24. Estado das variáveis de controlo nos sistemas com VC

Resultam como cargas dos sistemas considerados os valores indicados no quadro seguinte. Introduziu-se neste quadro a sigla QUTAN, referente à carga associada à UTAN e QVC, referente à dos ventiloconvectores.

Para a contabilização da carga admite-se um caudal de ar novo por pessoa de 45 m³/(h·ps). A carga removida ou introduzida na UTAN é exclusivamente referente ao

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

tratamento do caudal de ar novo, assumindo os ventiloconvectores o papel de tratar as cargas internas. Neste sistema, os ventiloconvectores removem a maior fatia de carga de arrefecimento do sistema.

No sistema B, o caudal de ar novo é variável, sendo em média 30% inferior ao caudal fixo do sistema A. Em qualquer dos sistemas, as unidades terminais removem mais de 70% da carga do sistema.

Sistema	QSist (-) [W·h]	QSist (+) [W·h]	QUTAN (-) [W·h]	QUTAN (+) [W·h]	QVC (-) [W·h]	QVC (+) [W·h]
A	5,77E+7	8,39E+6	8,24E+6	6,34E+6	4,58E+7	2,05E+4
B	5,73E+7	6,09E+6	6,55E+6	4,03E+6	4,70E+7	3,48E+4

Quadro 7.25. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas com VC

Os consumos nos diversos elementos são indicados no Quadro 7.26, onde é utilizada a sigla VC+Ve, que se refere ao consumo nos motores dos VC e no pequeno ventilador de exaustão das casas de banho. As restantes siglas têm o significado exposto na secção anterior. A possibilidade de variação do caudal de ar novo, fixando-se a temperatura de insuflação, reduz neste sistema o consumo de energia em cerca de 10%.

Energia [W·h]	Vi	Ve	VC+Ve	BP+BS	EAF	EAQ	Total
Sistema A	2,76E+6	9,47E+5	1,78E+6	1,52E+6	1,06E+7	1,10E+6	1,87E+7
Sistema B	1,85E+6	6,34E+5	1,78E+6	1,47E+6	1,04E+7	5,97E+5	1,68E+7

Quadro 7.26. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas com VC

7.4.3 Consumo de energia do sistema com tectos arrefecidos

Conforme anteriormente descrito, considera-se duas variantes ao sistema com tectos arrefecidos. Uma, em que a temperatura de insuflação é de 22 °C e outra em que a temperatura é variável em função da carga térmica. Em qualquer dos casos, o caudal de ar novo é definido pela ocupação máxima.

No programa de avaliação do funcionamento do sistema obteve-se as cargas de arrefecimento removidas pelos tectos arrefecidos, as massas de ar novo a introduzir em cada zona e a temperatura de insuflação.

Não foi considerada a carga de aquecimento dos espaços interiores ou o necessário reaquecimento do ar novo.

Para possibilitar o arrefecimento com desumidificação, a temperatura de insuflação é de 16 °C e a humidade específica considerada de 8 g/kg_{ar seco}. Dependendo das condições exteriores, a UTAN arrefecerá o ar e desumidificá-lo-á se necessário ou aquecê-lo-á, não garantindo, no entanto, a humidade referida. A UTAN tem ainda um recuperador de calor sensível entre a admissão e a exaustão de ar.

Na simulação do GPFC são consideradas duas máquinas: uma para a UTAN com o regime típico de temperaturas de 7 °C na saída, de modo a permitir arrefecer o ar e

Aplicação do Primeiro Axioma

desumidificá-lo; outra destinada apenas ao arrefecimento dos tectos com temperatura de saída da água de 16 °C. A diferença entre a ida e retorno na rede de arrefecimento dos tectos é de apenas três graus Celsius, o que tem implicações no consumo das bombas respectivas.

No cálculo das perdas de calor das redes de água para o ambiente interior ou exterior, considera-se as diferentes temperaturas de funcionamento. Assume-se que a rede que serve a UTAN está exposta ao ambiente exterior e que a rede que serve os tectos fica exposta maioritariamente ao ambiente interior.

As variáveis de controlo utilizadas para o funcionamento do programa são as apresentadas no quadro seguinte. Para a execução do programa, o caudal no ventilador foi fixado e as condições de temperatura nas redes de água (tev e dtM) foram alteradas, relativamente ao quadro original.

	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
Estado	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	---	+1	-0,6	-1	-1	-1

Quadro 7.27. Estado das variáveis de controlo nos sistemas com tectos arrefecidos

Muito embora as temperaturas de funcionamento da rede de água fria dos tectos arrefecidos seja superior à de um sistema convencional, a necessidade de uma UTAN que desumidifique obriga a manter um GPFC a funcionar nas condições comuns. No entanto, em termos gerais, as cargas removidas pelos tectos representam cerca de 70% da carga de arrefecimento removida. Ou seja, é possível aproveitar, na GPFC respectivo, a vantagem, em termos de consumo de energia, da utilização de temperaturas de arrefecimento mais elevadas.

Esta realidade é indicada no quadro seguinte, onde para cada um dos sistemas são indicadas as cargas associadas ao sistema, à UTAN e aos tectos. Neste quadro introduz-se a sigla QTct, referente às cargas removidas pelos tectos arrefecidos.

Sistema	QSist (-) [W·h]	QSist (+) [W·h]	QUTAN (-) [W·h]	QUTAN (+) [W·h]	QTct (-) [W·h]
1	4,76E+7	6,54E+6	1,01E+7	6,01E+6	3,54E+7
2	5,10E+7	7,24E+6	1,54E+7	6,71E+6	3,35E+7

Quadro 7.28. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas com tectos arrefecidos

A remoção destas cargas obriga à existência de diversos equipamentos consumidores de energia, nomeadamente os ventiladores de insuflação e de exaustão do ar novo, as bombas dos circuitos primários e secundários das redes de arrefecimento da UTAN e dos painéis dos tectos arrefecidos e, não menos importante, a energia consumida nas máquinas produtoras de água arrefecida. Acresce ainda ao consumo do sistema a energia gasta no

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

ventilador de exaustão das casas de banho. Os diferentes consumos são indicados no Quadro 7.29. As colunas seguem a nomenclatura anteriormente apresentada, excepto no que respeita a +Ve, que se refere apenas ao consumo no pequeno ventilador das casas de banho.

Um sistema com tectos arrefecidos caracteriza-se em termos energéticos por ter um consumo permanente associado à ventilação; obriga a que haja desumidificação na UTAN, de modo a que não se originem condensações nos tectos; a diferença de temperaturas no circuito secundário é menor do que a que é usualmente utilizada; e finalmente, permite que uma das máquinas frigoríficas funcione a uma temperatura de evaporação mais elevada.

Esta última característica e a possibilidade de utilização de um caudal de ar exterior a uma temperatura próxima da necessária constituem as grandes vantagens deste sistema.

O sistema energeticamente mais eficiente é o sistema 1, com temperatura de insuflação constante de 22 °C. No entanto, este sistema causa um elevado número de insatisfeitos. A possibilidade de variação da temperatura de insuflação expressa no sistema 2, sendo de difícil implementação física, permitiria melhorar o desempenho do sistema sem alterar significativamente os consumos para aquecimento e arrefecimento.

Energia [W·h]	Vi	Ve	+Ve	BP+BS	EAF	EAQ	Total
Sistema 1	2,75E+6	9,90E+5	1,41E+5	1,46E+6	7,62E+6	1,39E+6	1,44E+7
Sistema 2	2,75E+6	9,90E+5	1,41E+5	1,49E+6	8,28E+6	1,54E+6	1,52E+7

Quadro 7.29. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas com tectos arrefecidos

A implementação da variação da temperatura de insuflação implica conhecer a carga removida pelos painéis e a carga introduzida pelo ar novo. A primeira pode ser determinada usando contadores de entalpia da água arrefecida e a segunda por medição directa da temperatura de insuflação, face a um caudal de insuflação pré-determinado. Outras variantes a este sistema poderão ser estudadas, nomeadamente a possibilidade de variação do caudal de ar novo.

7.4.4 Consumo de energia do sistema com unidades de indução

Os sistemas com unidades de indução utilizam o ar novo, ou primário, como veículo para provocar a indução de um fluxo de ar na bateria das unidades terminais. Estas unidades podem ter uma bateria de arrefecimento e, eventualmente, uma bateria de reaquecimento. Para ambas as situações são simulados os consumos de energia.

Admite-se que o ar primário é insuflado a 16 °C, o regime de temperatura da água nas unidades de indução de 14 °C à entrada e 17 °C à saída, e o da UTAN de 7–12 °C. Nestas condições, a bateria de arrefecimento considerada para as UI retira 450 W, coadjuvada pela carga de 240 W removida pelo ar primário. Este tem um caudal obrigatoriamente constante de 3.780 m³/h, 50% superior às necessidades máximas de ar novo dos espaços.

Aplicação do Primeiro Axioma

Considera-se duas possibilidades de sistemas: uma em que as unidades terminais apenas podem arrefecer e outra em que têm também a possibilidade de aquecimento.

O programa segue genericamente os passos descritos na secção anterior relativa aos tectos arrefecidos. Existe igualmente uma UTAN que insufla o ar a uma temperatura constante com uma humidade específica de $8 \text{ g/kg}_{\text{ar seco}}$, caso a evolução psicrométrica seja de arrefecimento com desumidificação. Nos restantes casos a humidade relativa não é controlada. Esta unidade tem de vencer uma perda de carga adicional de 70 Pa na insuflação, necessária ao processo de indução nas unidades terminais. São utilizados também dois GPFCs, um adstrito à UTAN e outro, que funciona com temperaturas de evaporação mais elevadas, e que alimenta as unidades terminais.

As variáveis de controlo do programa são as indicadas no quadro seguinte, sendo que a relativa à temperatura do evaporador tem dois estados, dependendo do GPFC considerado.

	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
Estado	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	---	+1	-0,6	-1	-1	-1

Quadro 7.30. Estado das variáveis de controlo nos sistemas com unidades de indução

Tal como no sistema de tectos arrefecidos, existe um caudal de ar novo constante. Este ao ser arrefecido remove permanentemente uma carga interna significativa. Por força da concepção do sistema, as unidades terminais não têm prioridade na remoção da carga térmica. A carga térmica de arrefecimento removida na UTAN é portanto imposta, representando cerca de 65% da carga de arrefecimento do sistema. Estas cargas são indicadas no Quadro 7.31, em que a sigla QUI é referente às unidades de indução.

Sistema	QSist (-) [W·h]	QSist (+) [W·h]	QUTAN (-) [W·h]	QUTAN (+) [W·h]	QUI (-) [W·h]	QUI (+) [W·h]
1	5,62E+7	6,35E+5	3,66E+7	2,48E+5	1,73E+7	0
2	5,62E+7	5,97E+6	3,66E+7	2,48E+5	1,73E+7	3,63E+6

Quadro 7.31. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento nos sistemas com unidades de indução

Assim, a vantagem de utilização de uma temperatura de evaporação mais elevada no GPFC, que alimenta as unidades terminais, é diminuta face à sua utilização menos frequente. Ou seja, o sistema deve a sua eficiência mais ao arrefecimento gratuito provocado pela utilização de grandes caudais de ar novo, do que às elevadas temperaturas de funcionamento nos GPFCs.

O consumo de energia nos diversos equipamentos é apresentado, para os dois sistemas, no quadro seguinte. O significado das siglas foi já anteriormente indicado nas secções anteriores. Assume-se considerações análogas às expostas para os sistemas de tectos arrefecidos, nomeadamente no que respeita ao período de funcionamento das

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

bombas dos circuitos primário e secundário e ao funcionamento do pequeno ventilador de exaustão.

A diferença de consumo de energia entre os dois sistemas reside na utilização de uma carga de reaquecimento, no sistema 2, com o concomitante aumento da energia associada à bombagem e ao funcionamento das máquinas frigoríficas.

Energia [W·h]	Vi	Ve	+Ve	BP+BS	EAF	EAQ	Total
Sistema 1	4,29E+6	1,55E+6	1,41E+5	1,62E+6	9,98E+6	7,64E+4	1,83E+7
Sistema 2	4,29E+6	1,55E+6	1,41E+5	1,79E+6	9,98E+6	1,20E+6	1,96E+7

Quadro 7.32. Energia anual despendida nos equipamentos para sistemas com unidades de indução

A melhoria das condições de conforto é conseguida, no sistema 2, com um ligeiro acréscimo no consumo de energia relativamente ao sistema de utilização mais comum.

7.5 Resumo e Conclusões

Neste capítulo analisou-se os sistemas VAV, com UTAN e ventiloconvectores, com UTAN e tectos arrefecidos e com UTAN e unidades de indução. Pela aplicação do primeiro axioma da AP aos sistemas considerados, foram criadas as matrizes de projecto para cada um dos sistemas. Incluiu-se nestas matrizes as funções associadas à filtração, por coerência com o exposto no capítulo 3.

Da análise dessas matrizes resulta que o sistema VAV é acoplado. O caudal de ar novo entregue em cada zona, em cada momento, depende da sua carga térmica, mas também daquela que ocorre nas restantes zonas. A necessidade de insuflar um caudal de ar novo mínimo em cada espaço obriga que cada caixa VAV admita um caudal mínimo, que, quando vem arrefecido, poderá causar ocasionalmente desconforto. A solução normalmente adoptada neste sistema é a introdução de baterias de reaquecimento terminal.

O sistema com ventiloconvectores é independente, pelo que as cargas e o ar novo podem variar livremente. Este sistema pode mesmo ser aplicado se se pretender controlar a filtração em cada espaço.

É igualmente independente o sistema com tectos arrefecidos, desde que os painéis possam remover toda a carga e possam funcionar em modo de aquecimento e de arrefecimento. No entanto, nas situações correntes, não é possível haver aquecimento e arrefecimento simultâneo. Além disso, para poder remover-se as cargas nos edifícios, o ar novo é utilizado como veículo de arrefecimento. Assim, algumas zonas verão a sua temperatura reduzida a valores inferiores aos das condições de conforto.

Fixando-se a temperatura do ar de insuflação o sistema torna-se desacoplável; se esta temperatura depender das condições de carga das salas o sistema é acoplado.

Aplicação do Primeiro Axioma

O arrefecimento excessivo dos espaços causado pelo ar novo, ou ar primário, ocorre também em sistemas com unidades de indução. Nestes sistemas a carga a remover depende do ar novo e das baterias das unidades terminais. Este problema pode ser resolvido utilizando unidades terminais com baterias de aquecimento. Esta solução, também empregue nos sistemas VAV, surge como uma necessária emenda ao sistema, implicando que uma massa de ar seja arrefecida para posteriormente ser reaquescida.

O sistema com UI é acoplado. No entanto, se a temperatura de insuflação do ar primário for tornada fixa e se, adicionalmente, o seu caudal for constante e de valor muito superior ao normalmente necessário, então o sistema torna-se desacoplável.

Todos os sistemas simulados utilizaram o mesmo edifício apresentado no capítulo anterior. As simulações permitiram avaliar o comportamento dos sistemas em termos de conforto térmico e da qualidade do ar. Para o efeito foram utilizados os índices VMP e PPI da ISO 7730, avaliando-se a cada hora o número previsível de pessoas insatisfeitas com as situações de conforto. Uma avaliação similar é feita para a qualidade do ar interior, obtida pela percentagem de insatisfeitos com a concentração de CO₂. Os resultados destas análises são apresentados no Quadro 7.33. Neste quadro, o somatório anual do número esperado de pessoas insatisfeitas é denominado por “PI”, existindo uma coluna com o somatório das pessoas insatisfeitas com a concentração de CO₂, PI (CO₂), e outra para o somatório das pessoas insatisfeitas com as condições de conforto, PI (Conforto).

Introduz-se a eficiência funcional do sistema, EF, relativamente à qualidade do ar interior, QAI, e ao conforto, medida pela relação entre o número de pessoas-hora na gama definida para o projecto e o número total anual de pessoas-hora.

Sistema	Tipo de Sistema	Consumo Energia [W·h] x 10 ⁻⁷	EF QAI (%)	PI (CO ₂)	EF Conforto (%)	PI (Conforto)
VAV	1 A	1,86	100	16.743	100	14.458
	1 B	2,52	98	19.262	100	13.189
	2 A	1,82	100	16.852	100	14.458
	2 B	2,38	98	19.389	100	13.189
VC	A	1,87	100	16.195	100	12.908
	B	1,68	100	18.233	100	12.850
TA	1	1,44	100	16.195	73	21.622
	2	1,52	100	16.195	91	14.245
UI	1	1,83	100	12.143	87	19.797
	2	1,96	100	12.143	100	15.278

Quadro 7.33. Resumo do consumo, qualidade do ar e conforto para os sistemas analisados

Para o conforto definiu-se uma gama de variação da temperatura operativa entre os 20 °C e os 24 °C; para a qualidade do ar um caudal de ar novo por pessoa na zona ocupada superior a 35 m³/h.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

No sistema VAV utilizou-se um caudal de ar novo por pessoas de 45 m³/h, a que corresponde uma eficiência funcional próxima de 1 nos sistemas com caudal de ar novo variável e unitária nos de caudal de ar novo fixo. Todos os restantes sistemas têm eficiência funcional unitária.

Em termos de conforto térmico, os sistemas VAV, desde que se considere que têm reaquecimento, permitem cumprir os requisitos funcionais analisados. Uma situação similar ocorre nos sistemas com unidades de indução com reaquecimento. Cumprem ainda estes requisitos os sistemas com VC. Já os sistemas com tectos arrefecidos não conseguem cumprir os requisitos de conforto térmico.

Os menores valores de consumo de energia ocorrem nos sistemas com tectos arrefecidos. Estes sistemas têm a vantagem da utilização de um GPFC que funciona a uma temperatura mais elevada, não tendo consumo nas unidades interiores. Os sistemas com UI têm um consumo ligeiramente mais elevado, comparável ao dos sistemas com VC. A redução do consumo de sistemas com UI, deve-se mais ao arrefecimento gratuito motivado pelo ar novo do que às características das unidades terminais.

Cumprem os requisitos funcionais relativos ao conforto e à qualidade do ar, os sistemas VAV com caudal de ar novo constante (1A e 2A), os sistemas com VC (A e B) e os sistemas com unidades de indução com reaquecimento. Este sistema detém o mínimo de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar. Com EF unitária, é o sistema com VC e caudal de ar variável o que consome menos energia e detém o mínimo de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico.

Da exposição anterior propõe-se os seguintes axiomas:

Um sistema de climatização deve, em cada momento, poder introduzir o ar novo necessário à instalação independentemente da carga térmica interna a tratar;

Um sistema de climatização independente pode, por correcta escolha dos parâmetros, cumprir os requisitos funcionais de conforto e de qualidade ao ar interior;

Um sistema de climatização acoplado pode cumprir os requisitos funcionais de conforto e de qualidade ao ar interior, se for acrescentado um sistema auxiliar, de funcionamento independente, que colmate o mau funcionamento do primeiro.

7.6 Contributos, Opinião e Prosseguimento

São contribuições deste trabalho a aplicação do primeiro axioma da Teoria Axiomática de Projecto aos sistemas de Climatização e a identificação dos acoplamentos nestes sistemas usando as matrizes de projecto. É ainda contribuição deste trabalho a criação de programas de simulação dos diversos sistemas, com pressupostos equivalentes em termos de condições de conforto, de qualidade do ar e de características dos equipamentos utilizados. Aplicando-se estes programas aos diversos sistemas, verifica-se que, também nos sistemas de climatização, podem escolher-se soluções sem que haja necessidade de equilíbrios entre requisitos, sem que seja necessário otimizar as desvantagens.

Propõe-se como linha de desenvolvimento sobre os diversos sistemas a avaliação, a quantificação e a medição do papel do arrefecimento gratuito no arrefecimento dos mais diversos tipos de edifícios, em climas temperados atlânticos. Desta linha poderá concluir-se da exequibilidade da utilização de sistemas de ventilação mistos, forçados e naturais e, em consequência, da necessidade, ou não necessidade, de edifícios estanques.

Relativamente aos sistemas, propõe-se para os sistemas com ventiloconvectores, o desenvolvimento tecnológico de motores das unidades terminais mais eficientes e com velocidade variável; propõe-se para os sistemas com unidades de indução com reaquecimento, o desenvolvimento de sistemas de controlo, que permitam calcular as cargas internas dos espaços, ajustando em conformidade a temperatura de insuflação.

Relativamente à normativa e regulamentação, é importante que sejam definidas as gamas de variação dos requisitos funcionais dos sistemas. Ou seja, há que discutir se se deve admitir uma gama aceitável de condições para o conforto, como as indicadas na ISO 7730, ou se se admite que essa gama varie ao longo do tempo, de modo a definir uma “impressão digital” do sistema, tal como defende a EN 15251;

É necessário saber se deve existir um caudal de ar novo mínimo a garantir em cada momento, ou se se pode garantir um valor médio de concentração de alguns poluentes;

Há que discutir se os critérios de taxa de ventilação e de controlo de poluentes podem ser aplicados indiferentemente, ou se existe primazia de algum;

E, finalmente, há que definir qual o papel dos sistemas de filtração em ambientes típicos de edifícios terciários.

Dependendo das gamas de variação dos requisitos, alguns sistemas de climatização terão de ser modificados, ao passo que outros simplesmente não poderão ser aplicados.

Capítulo 8

Aplicação do Segundo Axioma

“... mas nenhum professor poderá iluminar as suas lições com cores vivas e profundas se não tiver vivido os problemas que trata, se não tiver investigado na disciplina que professa.”

António Aniceto Monteiro, in *Os Objectivos da Junta de Investigação Matemática*, 1944

8.1 Introdução

No capítulo anterior, avaliou-se quatro tipos diferentes de sistemas de Climatização, de acordo com o primeiro axioma da Teoria Axiomática de Projecto (AP). Concluiu-se desta aplicação, que diversos sistemas normalmente utilizados em Climatização são acoplados, com consequências em termos de conforto e na qualidade do ar interior. De acordo com a Teoria Axiomática de Projecto, os sistemas escolhidos devem ser independentes. São deste tipo os sistemas com ar novo dedicado, onde as unidades terminais se destinam à remoção integral das cargas internas. O ar novo é tratado nas UTANs e insuflado nos espaços em condições próximas das de conforto.

Resulta desta aplicação que os sistemas com ventiloconvectores e com tectos arrefecidos são sistemas independentes. Contudo, os painéis de um sistema de tectos arrefecidos dificilmente conseguem remover a carga interna por si só, nas aplicações típicas com o clima de Lisboa. Assim, estes sistemas necessitam normalmente do arrefecimento suplementar provocado pelo ar novo arrefecido.

Em consequência serão escolhidos, para objecto desta análise, os sistemas com ventiloconvectores. A mesma teoria estabelece ainda que, dos sistemas independentes considerados, devem ser escolhidos os que tiverem menor informação, preferencialmente informação nula.

Será este o objectivo deste capítulo: aplicar o segundo axioma da AP, ou lei da informação, aos sistemas com ventiloconvectores, variando as suas características principais, de modo a tornar nula a sua informação. Só algumas das características destes sistemas serão analisadas com o correspondente estudo dos requisitos funcionais e parâmetros de projecto associados.

Retornando à decomposição entre requisitos funcionais e parâmetros de projecto, expressa na Figura 7.1, os requisitos a cumprir por um sistema de Climatização são

“assegurar condições térmicas apropriadas” (RF 1.1), “assegurar ambientes interiores saudáveis” (RF 1.2) e “reduzir o consumo de energia do sistema AVAC” (RF 1.3).

Na Figura 7.3 foi indicada a decomposição destas funções no caso do sistema com ventiloconvectores. Das diversas funções a cumprir pelo sistema, centraremos esta avaliação nas funções descendentes de “assegurar ambientes interiores saudáveis”.

A função RF 1.1 foi suficientemente detalhada no Capítulo 7 e a RF 1.3 no Capítulo 6. Deixaremos para futuro desenvolvimento a aplicação do Segundo Axioma da AP a estas funções e às suas descendentes.

Neste capítulo, aplicaremos a formulação indicada no Capítulo 2 para a quantificação da

informação da função RF 1.2. Esta função depende da possibilidade de garantir a diluição da poluição e do controlo de partículas. Na Figura 8.1 apresenta-se a decomposição desta função para o sistema de climatização com ventiloconvectores.

Na avaliação que em seguida faremos, as funções RF 3.8 e 3.9, assim como a RF 3.10, serão substituídas pela definição de um caudal por área do edifício. Conhecendo-se um caudal por área, é possível calcular o caudal para cumprir qualquer das funções indicadas. Este caudal será quantificado recorrendo-se à ASHRAE 62.1 e à EN 13779.

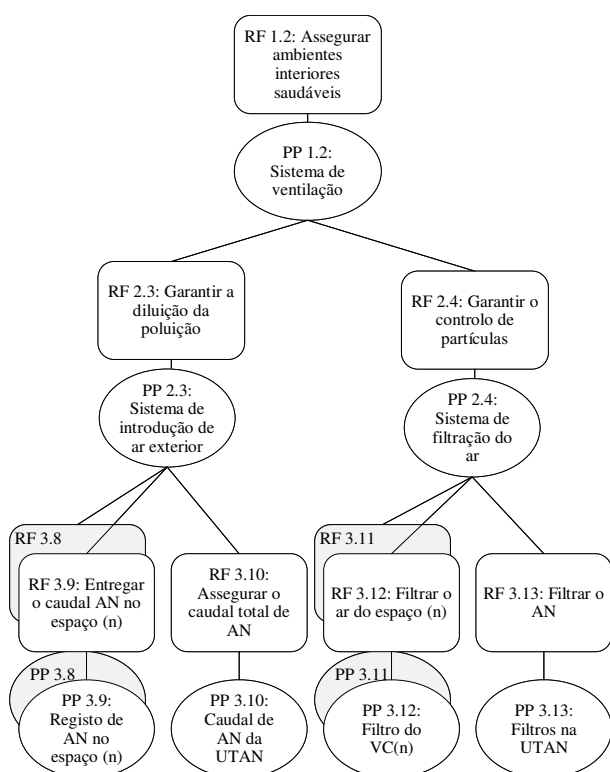


Figura 8.1. Decomposição de RF 1.2

Relativamente ao controlo de partículas, utilizar-se-á igualmente as indicações da EN 13779 e as considerações do Capítulo 3, pelo que apenas se define os filtros a utilizar na UTAN. Finalmente, há ainda a ressaltar que, na impossibilidade de definir um ambiente interior saudável, se substituirá a função RF 1.2 por uma mais simples de quantificar, a qual poderá ser enunciada como “satisfazer os ocupantes dos espaços relativamente à qualidade do ar interior”.

Este capítulo segue muito de perto um artigo que apresentámos em 2006 no quarto congresso do ICAD [8.1] em Florença, posteriormente apresentado em Junho de 2006 no congresso do “Portugal Chapter” da ASHRAE em Lisboa, na Ordem dos Engenheiros.

8.2 Ventilação e Filtração

Como exposto no Capítulo 3, as normas ASHRAE 62.1 e a EN 13779 são as referências dos EUA e da EU para a qualidade do ar interior. No entanto, enquanto a primeira pretende que o ambiente interior apresente uma qualidade aceitável, a norma europeia define quatro níveis de qualidade para o ar interior (IDA 1 a IDA 4).

Neste trabalho, abordar-se-á a taxa de ventilação dos espaços, admitindo que os efeitos da poluição gerada pelos materiais presentes nos espaços e os provocados pela presença de pessoas são aditivos na percepção da qualidade do ar interior. Assim, definir-se-á uma taxa de ventilação dos espaços, R_a , e uma taxa de ventilação por pessoa, R_p . Estas taxas são definidas pela ASHRAE 62.1 para ambientes de escritórios como $9 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ e $1,1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Já a EN 13779 define valores de ventilação em função do número de pessoas ou em função da área dos espaços, caso estes não sejam destinados a ocupação humana.

O quadro seguinte resume os valores presentes no anexo indicativo desta norma, na ausência de fumadores:

	Caudal de ar novo por área [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]			Caudal de ar novo por pessoa [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$]		
	Mínimo	Por defeito	Máximo	Mínimo	Por defeito	Máximo
IDA 1	n.d.	n.d.	n.d.	54	72	n.d.
IDA 2	2,5	3	n.d.	36	45	54
IDA 3	1,3	2	2,5	22	29	36
IDA 4	n.d.	1	1,3	n.d.	18	22

Quadro 8.1. Resumo de taxas de ventilação segundo a EN 13779 (n.d.: não definido)

É ainda referido no anexo da norma que as taxas por área para a categoria IDA 1 não podem ser definidas por este método. Como indicado no quadro, as taxas máximas para as categorias de maior qualidade não são definidas, tal como acontece com as mínimas para as categorias de menor qualidade.

A partir dos dados apresentados, pretende criar-se uma tabela de R_a e R_p aplicável às quatro categorias de qualidade do ar interior. As taxas definidas pela ASHRAE são vizinhas, por defeito, do máximo de IDA 4, para ocupações típicas de uma pessoa por 10 m^2 ; ou, por excesso, do mínimo de IDA 3, para espaços com menor ocupação do que 12 m^2 por ocupante. Por outro lado, a taxa de ventilação do espaço, R_a da ASHRAE 62.1, é próxima do valor por defeito de IDA 4.

Assemelhando as taxas da ASHRAE 62.1 à categoria IDA 4, mantendo as taxas de ventilação por unidade de área da EN 13779, usando os valores por defeito como valores centrados sempre que necessário, supondo que os máximos de R_p ocorrem para mínimos de R_a , admitindo ainda uma evolução da taxa R_p por defeito de acordo com as taxas por defeito da EN 13779, criando uma linha para IDA 1, por proporção directa dos valores por

Aplicação do Segundo Axioma

defeito das taxas de ventilação por área, admitindo uma ocupação de $10 \text{ m}^2/\text{ps}$ e limitando inferiormente R_p a $5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$, obteve-se o quadro pretendido, a seguir indicado.

Este quadro está adaptado a edifícios em que a área por ocupante seja de 8 a $12 \text{ m}^2/\text{ps}$, intervalo que é referido para pequenos escritórios, na versão de 2004 da EN 13779.

	$R_a [\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)]$			$R_p [\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})]$		
	Mínimo	Por defeito	Máximo	Mínimo	Por defeito	Máximo
IDA 1	3,5	4	4,5	17	36	55
IDA 2	2,5	3	3,5	16	22,5	29
IDA 3	1,3	2	2,5	6	14,5	23
IDA 4	0,7	1	1,3	5	9	15

Quadro 8.2. Taxas mínimas, máximas e por defeito de R_a e de R_p

Para além da taxa de ventilação, a EN 13779 refere ainda a filtração como parâmetro a ser considerado na definição da qualidade do ar interior. Os filtros são utilizados na UTAN e a sua classe é definida de acordo com a qualidade do ar exterior. Esta qualidade é definida de ODA 1 a ODA 3, sendo comum as grandes cidades europeias serem classificadas em ODA 2.

Para as categorias mencionadas, as classes de filtros devem ser definidas de acordo com o quadro seguinte:

	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDA 4
ODA 1	F9	F8	F7	F5
ODA 2	F7+F9	F6+F8	F5+F7	F5+F6

Quadro 8.3. Classes de filtros em função da qualidade do ar interior e exterior

Na definição da taxa de ventilação interfere ainda a eficácia de ventilação, a diversidade de ocupação e a calibração dos caudais em cada espaço.

A imprecisão na calibração dos caudais, I_p , pode facilmente variar em $\pm 10\%$; a diversidade de ocupação, D , de 70 a 100% dos valores máximos de projecto; e a eficácia de ventilação, E_v , entre 80 e 100%.

Face à inconstância na ocupação e no uso de um edifício, a definição de um caudal de ar novo de projecto por pessoa pode facilmente tornar-se desadaptado da realidade do edifício. Na realidade, não é inusitado a ocupação de espaços de um edifício ser alterada na fase de obra ou no início da sua ocupação.

Assim, definir-se-á uma taxa de ventilação típica para escritórios por cada 10 m^2 de espaço útil de escritório, destinado para ocupação humana, designada por V_{10} .

8.3 Definição de uma Taxa de Ventilação Vaga

Intervêm na definição da taxa de ventilação, V_{10} , para uma área A de 10 m^2 a diversidade de ocupação D , as taxas de ventilação por pessoa e por área, R_p e R_a , a eficácia de ventilação ε , e a imprecisão na calibração dos caudais l_p . É ainda necessária a ocupação, P , o número de pessoas na área A referida.

Alterando ligeiramente a expressão utilizada pela ASHRAE 62.1, define-se V_{10} por:

$$V_{10} = \frac{(D \cdot P \cdot R_p + A_p \cdot R_a) \cdot l_p}{\varepsilon} \quad (8.1)$$

Admita-se agora que cada uma das variáveis definidas na equação (8.1) é um conjunto graduado, definido por uma função de pertença triangular. Seja cada uma dessas funções expressa por $\mu_T(a; b; c)$, em que “a” e “c” representam os valores mínimos e máximos da variável para os quais a pertença é nula e “b” o valor para o qual a pertença é unitária.

Então, do que anteriormente foi referido, as variáveis da expressão (8.1) podem ser expressas conforme indicado no Quadro 8.4. Neste quadro, V1, V2, V3 e V4 representam as categorias de ventilação vaga associadas às categorias de qualidade do ar interior IDA 1 a IDA 4:

Variável	(a; b; c)	Categoria	$R_a [\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$	$R_p [\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{ps})]$
D	(0,7; 0,9; 1,0)	V1	(3,5; 4,0; 4,5)	(17; 36; 55)
P [ps/(10·m ²)]	(0,83; 1; 1,25)	V2	(2,5; 3; 3,5)	(16; 22,5; 29)
A [m ²]	(10; 10; 10)	V3	(1,3; 2; 2,5)	(6; 14,5; 23)
ε	(0,8; 0,9; 1,0)	V4	(0,7; 1,0; 1,3)	(5; 9; 15)
l_p	(0,9; 1,0; 1,1)			

Quadro 8.4. Variáveis vagas da equação (8.1) definidas como $\mu_T(a; b; c)$

Realizando com os conjuntos graduados indicados as operações expressas na equação (8.1), obtém-se a função de pertença para V_{10} . Para o cômputo dessas operações, foram realizados programas de cálculo com vista à prossecução de cada uma das operações básicas. Estes calculam os valores de pertença a cada corte alfa, nos conjuntos graduados intervenientes.

As funções obtidas para V_{10} são aproximadamente triangulares, sendo apresentadas no quadro seguinte para cada uma das categorias de ventilação vaga. Sendo o caudal V_{10} associado ao caudal por pessoa, o nível de satisfação com esta taxa de ventilação foi estimado pela aplicação da equação (3.31). Os resultados são apresentados a seguir:

Categoria da Ventilação	V_{10} [m ³ /h]	Satisfação (%)
V 1	(90; 110; 137)	(93; 95; 96)
V 2	(31; 56; 97)	(83; 90; 94)
V 3	(16; 37; 63)	(72; 85; 91)
V 4	(9; 20; 43)	(60; 76; 87)

Quadro 8.5. (a;b;c) para V_{10} e nível de satisfação

Para além da taxa de ventilação, interfere na qualidade do ar o tipo de filtros utilizados.

8.4 Definição de Classes de Filtros Vagos

Nesta secção, define-se as classes de filtros pela sua eficiência média na filtração do ar atmosférico de uma cidade. Conforme indicado no Capítulo 2, a EN 779 define a eficiência média de um filtro utilizando gotas de diâmetro de 0,4 µm, não sendo fácil conhecer a eficiência do filtro com partículas de outras dimensões.

A congénere dos EUA, a ASHRAE 55.2, define valores de eficiência mínima em três gamas de dimensões de partículas de cloreto de potássio (KCl). Ao contrário da EN 779, a eficiência medida pela norma ASHRAE 55.2 pode ser influenciada pela carga electrostática do filtro.

Nesta secção utiliza-se a classificação europeia, tendo-se definido a eficiência de filtração para cada dimensão de partículas usando catálogos de filtros e publicações da Eurovent. Dos dados obtidos, constata-se que os filtros de classe F5 e superior têm eficiências próximas de 100% para partículas maiores que 5 µm. Deste modo, para efeitos de eficiência de filtração, foi esse o valor utilizado enquanto limite superior. O limite inferior considerado foi de 0,5 µm, dimensão utilizada para classificar salas limpas e, como tal, admitido como razoável para limite mínimo na classificação de ambientes de escritórios.

Define-se os filtros como conjuntos graduados que expressem o enunciado: “um filtro que tem uma eficiência entre ‘a’ e ‘c’ para partículas entre 0,5 µm e 5 µm”.

Esta expressão linguística pode ser traduzida por uma função de pertença triangular $\mu_{TF}=t(a; b; c)$, em que b representa a média da eficiência de filtração. Esta média foi calculada pela relação entre o número de partículas retidas e o número de partículas atmosféricas no intervalo entre 0,5 µm a 5 µm.

Para o efeito, admite-se uma concentração atmosférica de 3×10^9 partículas/m³ com dimensão superior a 0,1 µm, típica do ar de uma cidade. O número de partículas de dimensão superior a δ , $N(\delta)$, é normalmente expresso pela lei de potência $N(\delta) = N_0 \left(\frac{\delta_0}{\delta}\right)^\beta$.

Nesta expressão, δ_0 é a dimensão de referência, para a qual ocorrem N_0 partículas de dimensão superior a δ_0 e β assume geralmente o valor de 2,209.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Se $E_i(\delta)$ for a eficiência inicial do filtro para as partículas de dimensão δ , e sendo a função densidade de partículas dada por $-\frac{d(N(\delta))}{d\delta}$, a eficiência inicial média do filtro com respeito ao número de partículas de dimensões entre δ_a e δ_c é dada por:

$$\bar{E}_i = \frac{\int_{\delta_a}^{\delta_c} N_0 \cdot \beta \cdot \delta_0^\beta \cdot \delta^{-(\beta+1)} \cdot E_i(\delta) \cdot d\delta}{\int_{\delta_a}^{\delta_c} N_0 \cdot \beta \cdot \delta_0^\beta \cdot \delta^{-(\beta+1)} \cdot d\delta} = \frac{N_0 \cdot \beta \cdot \delta_0^\beta \cdot \int_{\delta_a}^{\delta_c} \delta^{-(\beta+1)} \cdot E_i(\delta) \cdot d\delta}{N_0 \cdot \delta_0^\beta \cdot \left(\frac{1}{\delta_a^\beta} - \frac{1}{\delta_c^\beta}\right)} \quad (8.2)$$

Pelo que esta eficiência não depende de N_0 nem da dimensão de referência das partículas, δ_0 .

Para o cômputo da equação anterior, aproximou-se $E_i(\delta)$ por interpolação de *splines* cúbicos e a integração foi efectuada pela regra de Romberg. Recorreu-se para a interpolação e para a integração a sub-rotinas existentes na biblioteca do Matlab.

O Quadro 8.6 apresenta os dados de eficiência por dimensão de partículas utilizados e a eficiência média obtida \bar{E}_i . As eficiências utilizadas são médias de eficiências iniciais de filtros, sendo portanto ligeiramente inferiores aos valores das eficiências médias definidas na EN 779. No lado direito apresenta-se os filtros vagos, FF, definidos pelas funções triangulares $\mu_{TF}(a; b; c)$ anteriormente referidas. No processo de desgradação do conjunto vago, para obtenção dos valores determinados é utilizada uma medida central do conjunto, tipicamente a média. Assim, os valores determinados definidores dos filtros, podem ser entendidos como valores médios da eficiência inicial dos filtros.

Filtro	Eficiência $E_i \times 100$ (%) para partículas de dimensão em μm							$\bar{E}_i \times 100$ (%)	Filtro vago	(a; b; c) (%)
	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0			
F5	3	15	28	67	76	95	98	24	FF5	(15; 25; 98)
F6	15	26	45	75	91	97	98	40	FF6	(26; 38; 98)
F7	39	65	87	95	98	99	100	77	FF7	(65; 77; 100)
F8	59	80	95	97	98	99	100	88	FF8	(80; 88; 100)
F9	77	95	99	99	100	100	100	94	FF9	(95; 97; 100)

Quadro 8.6. Eficiências de filtração nos filtros G4 a F9 e filtros vagos associados

8.5 Complexidade Vaga

Conforme exposto no Capítulo 2, a solução escolhida para um projecto deve ser independente e com informação mínima.

O grau de cumprimento de uma função pode ser expresso no domínio funcional por uma probabilidade de ocorrência, que define uma função densidade de probabilidade, f.d.p. A informação é definida pela área delimitada na f.d.p. e pelo intervalo definido em projecto para o funcionamento do sistema. Este intervalo é designado por intervalo de projecto. A área delimitada pela f.d.p., pelo intervalo de projecto e pelo eixo das abcissas é designada por área de intersecção. No intervalo das abcissas desta área, o sistema funciona de acordo com o especificado.

A probabilidade, p , do correcto funcionamento do sistema é, então, calculada pela relação entre a área comum e a área da f.d.p., ou área do sistema. A informação, I , para um acontecimento de probabilidade p é então definida, como já anteriormente apresentado no Capítulo 2, por:

$$I = -\log_2(p) = \log_2\left(\frac{\text{Área do Sistema}}{\text{Área Intersecção}}\right) \quad (8.3)$$

Muito embora o intervalo de funcionamento do sistema seja definido, a função densidade de probabilidade é normalmente desconhecida ou de cômputo difícil.

A proposta deste Capítulo é definir a área do sistema por recurso à lógica vaga, na qual a f.d.p. é substituída por uma função de pertença, f.p. Os requisitos funcionais são então conjuntos graduados e, impondo regras de implicação em modo linguístico, determina-se f.p. A informação é igualmente calculada pela equação (8.3), sendo que a f.p. delimita a área do sistema e a área comum é obtida com a intersecção entre a f.p. e o intervalo de projecto.

Note-se que a área delimitada pela f.p. não é constante, ao contrário da definida pela f.d.p. que é unitária. No entanto, o cálculo da informação mantém-se, dado ser obtido por uma relação entre áreas delimitadas com a f.p. No caso particular em questão, pretende identificar-se as regiões com informação nula, ou seja, quando todo o sistema se comporta nos limites definidos em projecto.

O intervalo de projecto é definido para a expectativa de satisfação dos ocupantes. Definiu-se a expressão linguística de “mais de 90% de satisfeitos” pela f.p. trapezoidal, em que a pertença é nula em 85% e 100% e unitária entre 90 e 95%, $\mu_{TP} = tp(85, 90, 95, 100)$. Esta função é igualmente definida no espaço do requisito funcional associado à satisfação com a qualidade do ar interior, ou seja, no espaço de RF*1.2.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

No espaço de RF*1.2 é ainda definida a f.p. da função “Satisfazer os ocupantes dos espaços relativamente à qualidade do ar interior”. Esta é obtida pelas regras de implicação entre as premissas, taxa de ventilação e filtração utilizada, e a satisfação obtida.

Usa-se quatro classes de satisfação: muito satisfeito, satisfeito, algo satisfeito e pouco satisfeito. Estas classes são a seguir simbolizadas por MS, S, AS, PS, à semelhança das quatro categorias de IDA da EN 13779. Esta norma define as categorias do ar interior em função da ventilação, mas fá-las depender também da qualidade do ar exterior. É em função dessa qualidade que são indicados os filtros a serem utilizados.

As regras de implicação propostas consideram, para além dos filtros indicados na norma, outros com menor eficiência. Esta suposição baseia-se no exposto no Capítulo 3, relativamente ao número de partículas presentes no ambiente interior.

Usando as taxas de ventilação descritas no Quadro 8.5 e as definições de filtros vagos do Quadro 8.6, obtém-se as consequências destas escolhas na forma de uma tabela de implicação, aplicando as regras de implicação. Esta tabela é definida no Quadro 8.7, aqui designada por regra R2. Os resultados desta implicação pertencem ao espaço da função RF*1.2.

Neste quadro, apresenta-se ainda as classes de satisfação definidas por funções de pertinência triangulares, $\mu_T = t(a,b,c)$ inspiradas nas classes definidas no Quadro 8.5.

R2	V 1	V 2	V 3	V 4	Classes de RF* 1.2	(a,b,c) (%)
FF 5				PS	MS	(93; 95; 98)
FF 6		AS	PS	PS	S	(85; 90; 95)
FF 7	S	S	AS		AS	(70; 85; 90)
FF 8	MS	S			PS	(60; 75; 85)
FF 9	MS					

Quadro 8.7. Regras de implicação R2 para RF*1.2 e suas classes

Na construção da tabela de implicação, assumiu-se a filtração obtida nas unidades terminais como sendo secundária. A influência dos filtros destas unidades no número de partículas presentes no ambiente é de ordens de grandeza inferior à influência do filtro da UTAN.

Com as premissas, ou antecedentes, e as regras de implicação, é possível determinar as consequências de cada opção, ou consequentes.

Para o efeito elaborou-se um programa que determina a informação associada a um par determinado de taxa de ventilação e filtração.

A seguinte descrição ilustra melhor o funcionamento deste programa. Utilize-se um par de valores de ventilação e de filtração para caracterizar os parâmetros de projecto numa determinada situação. Seja este par o caudal de ar novo por 10 m² de área ocupada e a eficiência de filtração, em seguida referidos como (q, ϵ_i). Cada par destes valores pertence, com graduações diferentes, a uma ou mais categorias vagas de ventilação, V1 a V4, e de

filtração, FF5 a FF9. Ora, cada uma destas categorias terá uma influência diferente no cumprimento de RF*1.2, de acordo com a tabela de implicação. O conjunto das implicações obtidas representa a f.p. associada ao par de valores. A sua intersecção com o intervalo de projecto define a informação de (q, ε_f) .

Fazendo variar q e ε_f é possível determinar o domínio em que a informação é nula.

Seja $(q, \varepsilon_f) = (50, 85)$. O caudal q pertence às categorias V2 e V3 de ventilação, com diferentes graus de pertença $\mu_{V_{10}}$, calculados pelas funções triangulares de cada uma das quatro categorias. Neste caso, a pertença às quatro categorias de ventilação definidas é de $\mu_{V_{10}}(50) = [0,00 \ 0,76 \ 0,50 \ 0,00]$ ou, de modo linguístico, pode afirmar-se que q pertence sobretudo a V2, mas também a V3. De modo semelhante, a pertença de ε_f é $\mu_{\varepsilon_f}(85) = [0,18 \ 0,22 \ 0,65 \ 0,63 \ 0,00]$, pelo que ε_f não pertence à categoria FF9 e pertence sobretudo a FF7 e a FF8. De todos os valores do produto cartesiano $\mu_{V_{10}} \times \mu_{\varepsilon_f}$, só os presentes na tabela de implicação terão implicações na satisfação. Por exemplo, $(q, \varepsilon_f) \in (V2, FF5)$, mas não está definida uma implicação para este par de categorias; já $(V2, FF7) = (0,76 \ 0,65)$ implica a classe de satisfação S.

Assumindo de modo conservativo que o efeito na satisfação depende sobretudo do mínimo de pertença a uma categoria, a satisfação decorrerá do $\min(V2, FF7)$. Terão igualmente implicações os pares $(V2, FF6)$, $(V2, FF8)$, $(V3, FF6)$ e $(V3, FF7)$. O conjunto destes mínimos, ou antecedente, produzirá efeitos no conjunto das funções de satisfação.

O operador de implicação utilizado foi o produto de Larson, que actua sobre as funções de satisfação com o factor de escala determinado pelo mínimo dos antecedentes. As funções obtidas são os consequentes da implicação. No exemplo, a função de S será multiplicada por um factor de escala de 0,65, ou seja, obtém-se o consequente dado por $\min(V2, FF7) \cdot \mu_S$.

Assim, gera-se cinco funções consequentes, obtidas da actuação de diferentes factores de escala sobre as funções de satisfação, S, AS e PS.

O resultado agregado dos consequentes é a f.p. de satisfação causada pelo par determinístico (q, ε_f) , obtida pelo máximo dos consequentes.

A Figura 8.2 representa os consequentes dos pares referidos e as áreas necessárias ao cômputo da informação. No lado esquerdo da figura são ilustrados os consequentes da implicação, nomeadamente os do exemplo acima descrito. No lado direito apresenta-se a agregação das funções, ou seja, a f.p. do sistema. São ainda representadas as f.p. do projecto e da área comum.

No presente caso, a informação obtida é de 1,45.

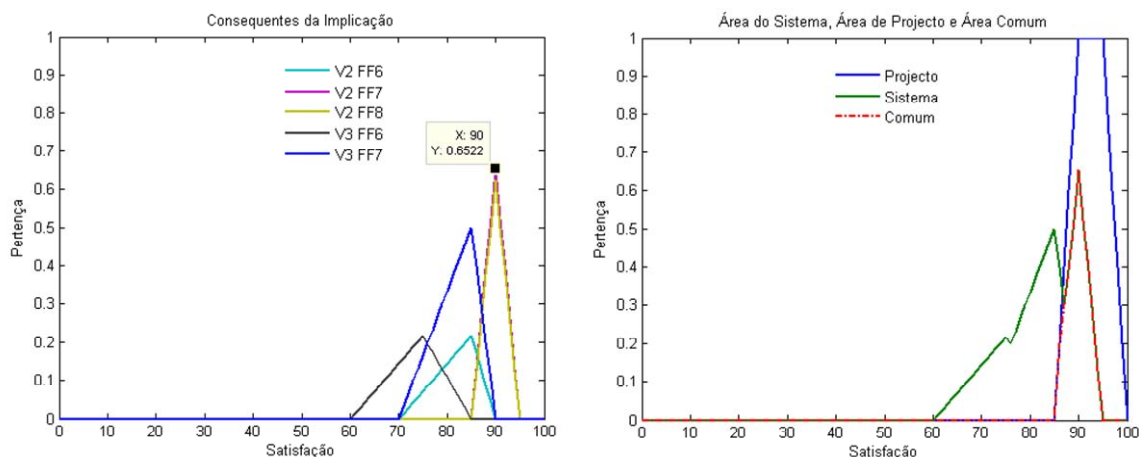


Figura 8.2. Consequentes da implicação e áreas necessárias à Informação

8.6 Resultados e Discussão

Aplique-se o programa descrito na secção anterior aos pares (q, ϵ_f) obtidos do produto cartesiano de caudais entre 35 e 135 m³/h em 10 m² e filtrações entre 25 e 99%. Obtêm-se deste modo a informação para todos os pares de valores, escolhendo-se então aqueles para os quais a informação é nula.

Usou-se dois intervalos de projecto, enunciados por “mais de 80% de satisfeitos” e “mais de 90% de satisfeitos”.

As superfícies obtidas são apresentadas na Figura 8.3, sendo a da esquerda relativa a uma satisfação superior a 80% e a da direita a uma satisfação superior a 90%. Valores de informação infinita, que ocorrem nos casos em que a área comum é nula, foram numericamente limitados a 4, surgindo como superfícies planas.

Na superfície da esquerda surgem valores de informação próximos de zero para V_{10} superior a 60 (m³/h)/10m². No entanto, valores de informação nula só ocorrem para caudais superiores a 97 (m³/h)/10m² e filtração superior a 66%. No caso do segundo intervalo de projecto, o par (q, ϵ_f) é igualmente (97, 66).

Assim, para que o sistema funcione com informação nula, o caudal de ar novo por 10 m² de área ocupada deve ser de 97 m³/h e a eficiência média do filtro de 66%. O primeiro valor corresponde a cerca de 3 renovações do ar da sala por hora, ou a mais do dobro do caudal mínimo aconselhado em normas e regulamentos. O filtro aconselhado será um F7.

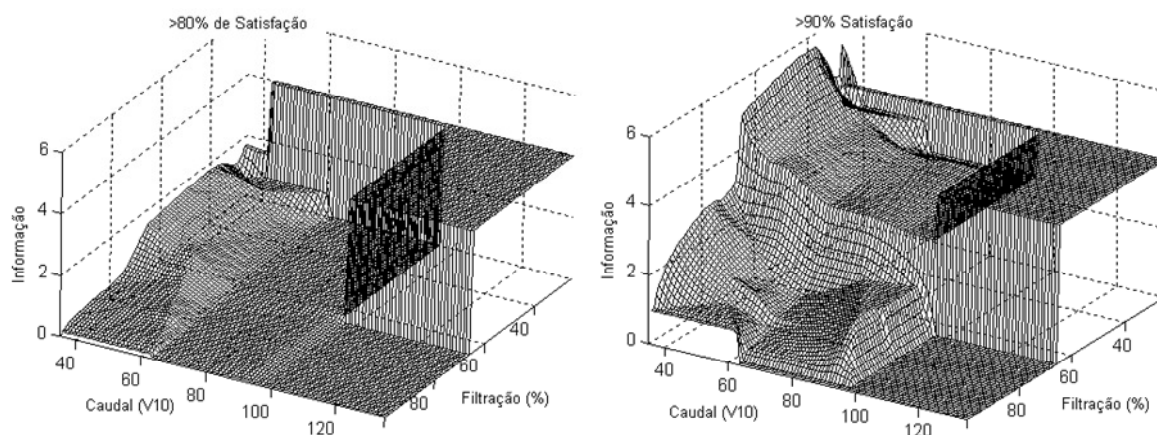


Figura 8.3. Superfícies de informação para 80 e 90% de Satisfação com a regra de implicação R2

Estas conclusões baseiam-se necessariamente nas regras de implicação definidas no Quadro 8.7.

Avaliaremos em seguida outras regras de implicação. Por hipótese, considere-se uma implicação menos exigente, em que a ventilação determina a satisfação obtida, R1; e outra mais exigente, R3, que siga mais de perto o anexo informativo da EN 13779.

Ambas as regras de implicação são apresentadas no Quadro 8.8. Na tabela da esquerda, são apresentadas as regras de implicação de menor exigência; e à direita, a de maior exigência.

R1	V 1	V 2	V 3	V 4	R3	V 1	V 2	V 3	V 4
FF 5				PS	FF 5				
FF 6		S	AS	PS	FF 6				PS
FF 7	MS	S	AS		FF 7			AS	
FF 8	MS	S			FF 8		S		
FF 9	MS				FF 9	MS			

Quadro 8.8. Regras de implicação menos exigente, R1, e mais exigente, R3

Os resultados obtidos para a situação menos exigente, regra 1, são apresentados na figura seguinte. Os valores de informação nula ocorrem para pares (q, ϵ_f) superiores a $(63,27)$, permitindo utilizar, porventura, um filtro de classe FF5.

No entanto, existem diferenças significativas no valor da informação entre as duas superfícies, para valores de V_{10} inferiores a 63. No caso da superfície da esquerda, a média de informação para um caudal de $45 \text{ (m}^3\text{/h)}/10\text{m}^2$ com filtros entre 28 e 99% de eficiência é apenas de 0,14.

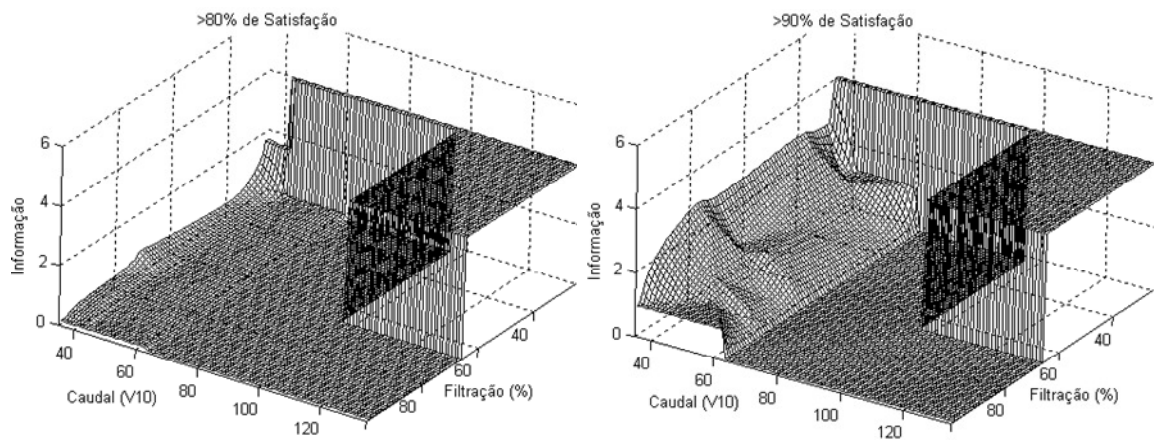


Figura 8.4. Superfícies de informação para 80 e 90% de Satisfação com a regra de implicação R1

Finalmente com a regra de implicação 3 obteve-se as superfícies similares, nas quais a informação nula ocorre para (q, ϵ_i) superiores a $(63,81)$ obrigando a usar um filtro de classe F7 ou preferencialmente F8.

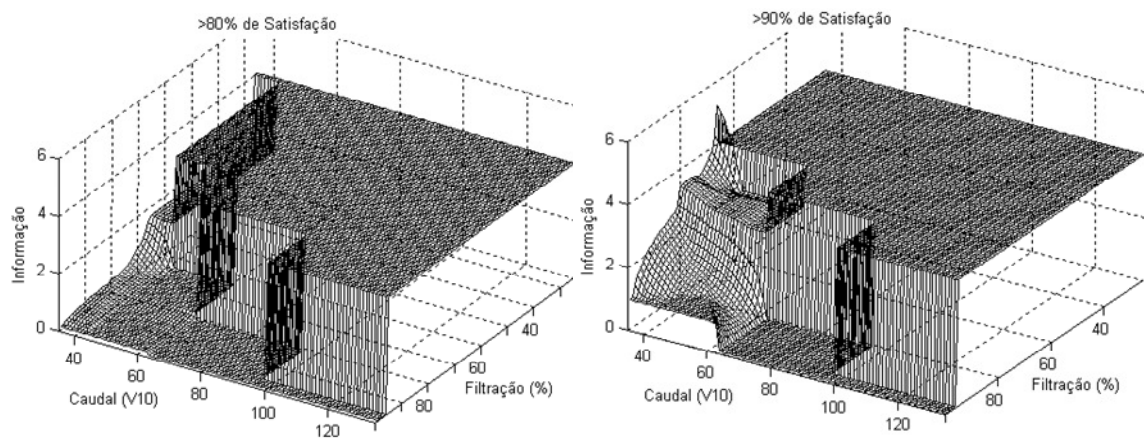


Figura 8.5. Superfícies de informação para 80 e 90% de Satisfação com a regra de implicação R3

Realizando a mesma análise para a superfície da esquerda, relativa ao nível de satisfação superior a 80%, obtém-se uma média de informação de 0,14, para um valor de V_{10} de 45 e de Filtração entre 66 e 99%.

8.7 Resumo e Conclusões

Neste capítulo, determinou-se a informação associada à função RF^{1.2}, “Satisfazer os ocupantes dos espaços relativamente à qualidade do ar interior”. Esta função surge em substituição da RF 1.2, “Assegurar ambientes interiores saudáveis”, face à visível dificuldade de a definir. Esta tem sido, aliás, a opção das linhas de investigação sobre a matéria.

O cálculo da informação obriga a definir a função densidade de probabilidade, f.d.p., associada à probabilidade do desempenho do sistema no cumprimento do requisito funcional. Neste trabalho, optou-se por utilizar conjuntos graduados da lógica vaga, para definir uma função de pertença, f.p., em alternativa à mais difícil definição da f.d.p.

Definiu-se como causas do desempenho, ou antecedentes, os conjuntos graduados que representam a ventilação e a filtração, filhos de RF 1.2. Para a ventilação, foi proposta a variável V_{10} , conjunto graduado que exprime o caudal necessário para ventilar 10 m² de área, tipicamente a área média adstrita a uma pessoa em ambiente de escritórios. Para a filtração definiram conjuntos graduados, FF, de FF5 a FF9 inspirados nas classes de filtros F5 a F9 da EN 779.

Utilizou-se três regras de implicação, R1 a R3, baseadas na EN 13779. A R3 segue de perto a norma, ao passo que as outras duas são menos exigentes no que diz respeito à classe de filtros a utilizar.

Com base nestas regras, determinou-se os consequentes da implicação. Por agregação do conjunto dos consequentes, determinou-se a f.p.

Definiu-se ainda dois níveis de satisfação, superior a 80% e superior a 90%, a que se associaram conjuntos graduados. Por intersecção das áreas delimitadas por estes conjuntos, pela f.p. e pelo eixo das abcissas, obteve-se a área comum.

A informação é obtida com a relação entre a área comum e a área do sistema, esta delimitada entre a f.p. e o eixo das abcissas. Se a informação for nula, o funcionamento do sistema cumpre sempre os limites definidos em projecto.

Calculou-se então a informação para valores de V_{10} entre 35 e 135 (m³/h)/10m² e para filtração entre 25 e 99%, obtendo-se as regiões em que a informação é nula. Os valores mínimos de caudal e de filtração para os quais se obteve uma informação nula são apresentados no quadro seguinte:

(V_{10} , FF)	>80% de Satisfação	>90% de Satisfação
Implicação R1	(63,27)	(63,27)
Implicação R2	(97,66)	(97,66)
Implicação R3	(63,81)	(63,81)

Quadro 8.9. Caudal V_{10} e filtro FF mínimo para informação nula

Muito embora os valores do quadro anterior não se alterem com o grau de satisfação, para valores de satisfação superiores a 80% é possível encontrar valores de informação

muito baixos, inferiores a 0,15, a partir de valores de V_{10} superiores a 45 e de filtração superiores a 28%.

8.8 Contributos, opinião e prosseguimento

São contributos deste capítulo a aplicação de conjuntos graduados ao cálculo da informação do requisito funcional RF^{*}1.2; a formulação de um programa de cálculo para a computação dessa informação; e a criação dos conjuntos graduados necessários usando como suporte as normas existentes sobre ventilação e filtração.

Com base nos resultados obtidos, é importante investigar melhor qual o papel dos filtros num sistema de climatização. Colocamos três possibilidades de discussão: os filtros devem remover as partículas que possam colmatar as baterias; ou devem permitir uma concentração interior análoga à dos ambientes exteriores citadinos; ou ainda, devem remover uma percentagem elevada de partículas do ar exterior de modo que o ambiente interior tenha menor concentração do que os ambientes exteriores.

A escolha entre estas três possibilidades tem implicações de consumo energético e de saúde pública importantes.

Tem ainda forte influência o caudal de ar novo a utilizar e o nível de satisfação pretendido. O incremento do caudal de ar novo pode em alguns sistemas contribuir para reduzir o consumo de energia.

Do que foi dito, e dependendo das consequências energéticas face ao sistema considerado, inclinamo-nos fortemente para associar um caudal de ventilação de 45 a 60 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ a um sistema de filtração com filtros F6 ou F7.

Indica-se as seguintes três linhas de prosseguimento: a articulação deste trabalho com novos dados sobre ventilação e filtração, nomeadamente por inclusão de ventilação natural ou mista nos sistemas de climatização em escritórios; a utilização do método descrito a outras aplicações de climatização, nomeadamente hotéis, espaços comerciais, auditórios, restaurantes, hospitais, etc; e ainda a necessária aplicação do método descrito à minimização da informação associada às funções RF 1.1, “Assegurar condições térmicas apropriadas”, e RF1.3, “Reduzir o consumo de energia do sistema AVAC”, a diversos sistemas descritos nos capítulos 5, 6 e 7.

Capítulo 9

Uma Solução: MU 10211

“... as palavras ouvem-se, as obras vêem-se;
as palavras entram pelos ouvidos, as obras
entram pelos olhos, e a nossa alma rende-se
muito mais pelos olhos que pelos ouvidos.”

Padre António Vieira, “Sermão da
Sexagésima”, 1655

9.1 Introdução

Nos capítulos anteriores, aplicou-se os dois axiomas da Teoria Axiomática de Projecto aos sistemas de climatização, nas vertentes do conforto, qualidade do ar e consumo de energia.

Não ficaria este trabalho completo sem uma solução aventada de um sistema de climatização que seja independente, com informação nula e que apresente um reduzido consumo de energia. Do exposto no Capítulo 7, esta solução deverá tratar as cargas internas sem auxílio de ar novo arrefecido. O sistema deverá ainda cumprir os requisitos de caudal de ar novo e de filtração, que, conforme indicado no Capítulo 8, deverá garantir pelo menos $63 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ps})$ e ter filtros de classe F7.

O sistema apresentado em seguida é muito simples, talvez tão simples que não possa sequer vir a merecer a atenção do mercado. Mas, como simples que é, contém toda a “informação” necessária ao seu funcionamento, não necessitando de sistemas auxiliares e antagonísticos que colmatem as suas falhas.

Este sistema, proposto ao sistema de Patentes nacionais na qualidade de Modelo de Utilidade, foi aceite pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial, INPI, em 2008 sob o número MU 10211 [9.1]. Pode ser encarado como uma variante de um sistema típico com ventiloconvectores.

O modelo que apresentaremos é aplicável a edifícios de serviços com cargas internas importantes, em climas mediterrânicos ou atlânticos moderados. Constitui uma tentativa de criar um sistema de climatização adaptado às condições climáticas locais, que, ao mesmo tempo, tenha um baixo consumo de energia, seja simples de instalar, de controlar e tenha um custo de instalação baixo.

9.2 O Modelo de Utilidade

O sistema ora proposto é aplicável a espaços de escritórios ou outros com cargas internas elevadas, de funcionamento diurno, que operem num clima como o de Lisboa. O sistema socorre-se do arrefecimento gratuito provocado pelo ar exterior, pelo que se supõe possa também ser aplicado a outros climas temperados, em que a carga removida pelo ar novo seja muito superior à carga por ele introduzida nos períodos estivais.

Na realidade, sendo a temperatura média anual em Lisboa nos períodos de ocupação de cerca de 18,5 °C e as temperaturas de conforto superiores a este valor, o aumento do caudal de ar novo contribui em média para remoção das cargas internas. Desde que haja necessidade de remover cargas ao longo de períodos alargados para além da estação de arrefecimento, então o aumento do caudal de ar novo contribuirá geralmente para a redução do consumo de energia.

No capítulo anterior verificou-se que o ar novo deveria ser incrementado para valores superiores a 63 m³/(h·ps), valor que neste sistema permite ao mesmo tempo melhorar a qualidade do ar e reduzir o consumo de energia.

No capítulo 7 constatou-se que, dos sistemas estudados, apenas o sistema com ventiloconvectores e o sistema com tectos arrefecidos, sem contribuição do arrefecimento do ar novo para a remoção das cargas internas, eram independentes. Verificou-se, no entanto, que este sistema não permitia suprir as necessidades de arrefecimento e de aquecimento. Apurou-se, ainda, que a vantagem energética de um sistema com unidades de indução residia na utilização do ar exterior. Caso utilizasse reaquecimento nas unidades terminais, o sistema era tecnologicamente desacoplável.

O sistema que agora se propõe é independente, tem informação nula, no contexto definido no capítulo anterior e utiliza o arrefecimento gratuito do ar novo. É uma variante de um sistema com ventiloconvectores em que o ar novo é introduzido normalmente à temperatura exterior, sendo a sua temperatura corrigida apenas em situações extremas. Por exemplo, caso a temperatura exterior seja inferior a 14 °C, o ar novo é aquecido, e caso seja superior a 28 °C, é arrefecido para as temperaturas indicadas.

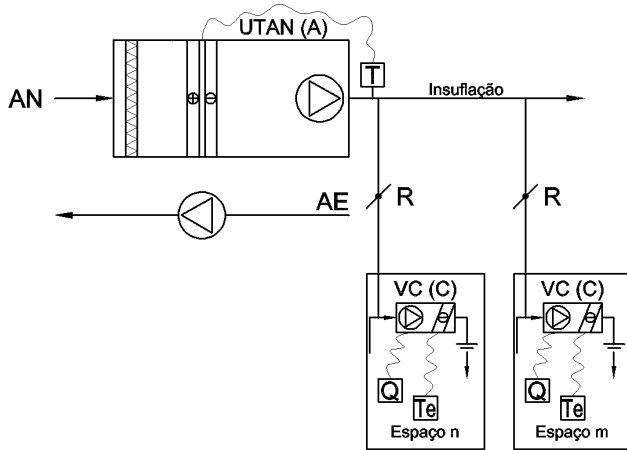
Num sistema comum com ventiloconvectores há independência permanente entre o caudal de ar novo e a remoção das cargas internas; no sistema proposto a independência deve ser encarada em função do funcionamento em cada momento. Na realidade, a cada hora, é introduzido o caudal de ar novo definido para cada espaço. A carga interna e a carga do ar novo de cada espaço são removidas nas suas unidades terminais. Note-se que não existe acoplamento por este facto, dado que a bateria pode em qualquer situação, tratar a carga conjunta do ar novo e da bateria.

Neste sistema, a UTAN está dedicada apenas à introdução do ar novo e as unidades terminais à remoção das cargas. Em consequência, as unidades terminais terão de ter maior

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

capacidade de arrefecimento e de aquecimento do que as unidades de um sistema convencional. Ademais, a relação entre a potência da bateria de aquecimento e a potência da bateria de arrefecimento é aumentada, ou seja, para aplicação deste sistema é possível que haja necessidade de redesenhar algumas máquinas existentes.

A Figura 9.1 apresenta um esquema de princípio do sistema. A UTAN, unidade A, insufla



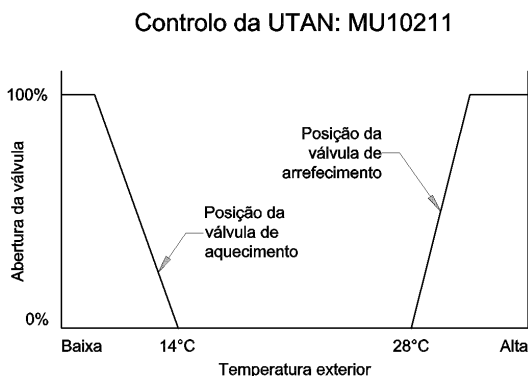
o ar novo para uma rede de condutas que distribuem o ar novo pelos diversos espaços. Esta unidade tem por função insuflar o ar e filtrá-lo, arrefecendo-o ou aquecendo-o apenas em situações extremas. As unidades terminais, C, em princípio ventiloconvectores (VC), removem a carga conjunta interna e a do ar novo.

Figura 9.1. Esquema de princípio do sistema proposto

De modo análogo ao sistema com VCs, o caudal de ar novo é entregue a cada espaço sendo regulado em R. O caudal dos VCs é controlado por Q e a temperatura do espaço pelo controlador Te. Neste sistema, o controlo modulante da UTAN segue o esquema apresentado na Figura 9.2. Quando a temperatura exterior é muito baixa a válvula de aquecimento abre; se a temperatura exterior é elevada abre a válvula de arrefecimento.

O sistema, sucintamente descrito anteriormente, foi reivindicado como modelo de utilidade, com o seguinte texto:

“Sistema de Climatização com ar novo dedicado (unidade A), utilizando unidades terminais (C), caracterizado por o ar novo ser mantido nas condições exteriores numa gama alargada de temperaturas, p.e. entre os 14 °C e os 28 °C, sendo o processo de



arrefecimento ou de aquecimento suplementar necessário realizado nas unidades terminais, utilizando dois ou quatro tubos, em que: na fase de arrefecimento, o ar novo é insuflado da unidade A e arrefecido nas unidades terminais (C), conjuntamente com o ar de recirculação; na fase de aquecimento, o ar novo é insuflado da unidade A e aquecido nas unidades terminais (C), conjuntamente com o ar de recirculação.”

Figura 9.2. Esquema de princípio do controlo

Reivindicou-se ainda a possibilidade de a UTAN dispor de controlo de humidade, de poder existir recuperação entre o ar novo e o ar de rejeição, do controlo de temperatura nos espaços ser local ou interligado a um sistema central, da unidade central e terminais serem a dois ou a quatro tubos e, finalmente, a possibilidade de utilização de outras unidades terminais para além dos ventiloconvectores.

Nas secções seguintes avalia-se este sistema de acordo com a Teoria Axiomática de Projecto, estimando-se ainda o consumo de energia que ocorreria se este sistema fosse aplicado ao exemplo utilizado no Capítulo 7.

9.3 Aplicação do Primeiro e Segundo Axiomas

A diferença entre este sistema e um sistema clássico com ventiloconvectores reside no facto de a temperatura de insuflação da UTAN ser balizada num intervalo razoavelmente alargado, em lugar de ser ajustada a valores próximos da temperatura de conforto. A função RF 2.5 passa a ser “Balizar temperatura de insuflação da UTAN”.

As restantes funções seguem de perto as características descritas para um sistema com ventiloconvectores.

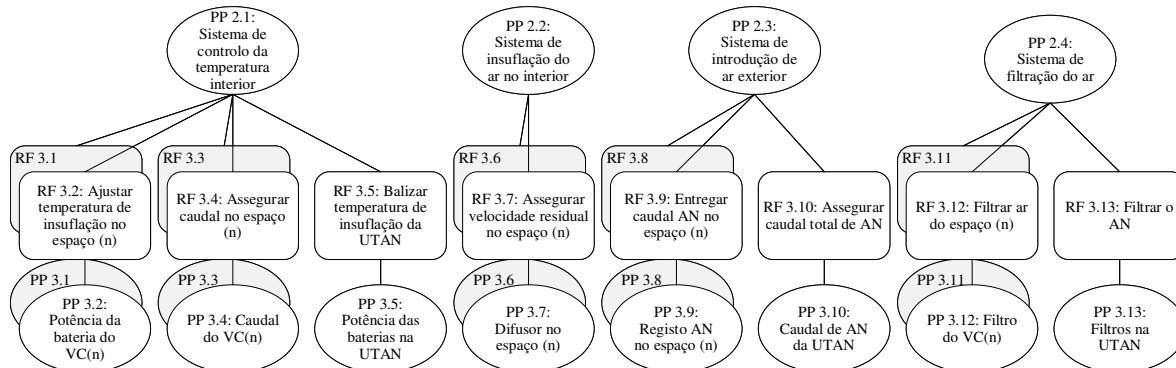


Figura 9.3. Decomposição PP-RF a partir do nível dois de decomposição do MU 10211

As funções RF 3.1 e RF 3.2 dependem da potência disponibilizada na bateria do ventiloconvector, desde que assegurado um caudal de ar. Este caudal, PP 3.4, varia numa gama determinada pela variação de velocidade do motor do ventiloconvector, normalmente com três velocidades discretas. O sistema de difusão do ar, PP 3.7, é calculado de modo a poder assegurar a velocidade residual no espaço. A potência disponibilizada nas baterias da UTAN, PP 3.5, permite enquadrar a temperatura de insuflação nos limites pretendidos.

O ar novo na UTAN é definido em função das necessidades globais, sendo entregue em cada espaço pelo correcto balanceamento de caudais. Este balanceamento pode ser dinâmico, em função da ocupação ou de outro parâmetro medido.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Finalmente, o sistema de filtração, assente predominantemente no filtro da UTAN, PP 3.13, garante a filtração do ar novo. A concentração de partículas no interior é obtida do equilíbrio entre a concentração de insuflação e a geração interior. Os filtros dos ventiloconvectores contribuem para a redução local da concentração de partículas, muito embora sejam sobretudo utilizados para protecção das baterias.

A equação de projecto é apresentada em (9.1), representando um sistema independente, em que são assinalados com “x” os pequenos efeitos relativos à variação de caudal dos ventiloconvectores. Estes efeitos ocorrem no ajuste da temperatura interior, na velocidade residual do ar e na filtração em cada espaço.

RF0	X		PP0
RF1.1	X		PP1.1
RF1.2		X	PP1.2
RF1.3		X	PP1.3
RF2.1		X	PP2.1
RF2.2			PP2.2
RF2.3		X	PP2.3
RF2.4			PP2.4
RF2.5		X	PP2.5
RF2.6			PP2.6
RF2.7		X	PP2.7
RF2.8			PP2.8
RF3.1		X	PP3.1
RF3.2			PP3.2
RF3.3		X	PP3.3
RF3.4			PP3.4
RF3.5		X	PP3.5
RF3.6			PP3.6
RF3.7		X	PP3.7
RF3.8			PP3.8
RF3.9		X	PP3.9
RF3.10			PP3.10
RF3.11		X	PP3.11
RF3.12			PP3.12
RF3.13		X	PP3.13

Exceptuando-se estes acoplamentos de menor importância, o sistema é independente. Estes podem mesmo ser removidos se a velocidade do ventilador for fixada.

A aplicação do segundo axioma, de acordo com o exposto no capítulo anterior e no âmbito das funções analisadas, obriga a que o caudal de ar novo por pessoa seja superior a 63 m³/h e a que o filtro da UTAN seja de classe F7.

Na secção seguinte, avalia-se o funcionamento deste sistema.

9.4 Avaliação do Funcionamento do MU 10211

O sistema MU 10211 é independente, o que lhe permite adaptar-se às condições de carga térmica independentemente do caudal de ar novo especificado. Este pode assim cumprir, em qualquer instante, qualquer dos requisitos funcionais associados ao conforto térmico e à qualidade do ar, pelo que a eficiência funcional do sistema é unitária para estes requisitos.

Apresenta-se de seguida os resultados da avaliação do funcionamento do edifício utilizado nas simulações dos capítulos 6 e 7, quando climatizado com o sistema MU 10211. Relativamente ao conforto, igualmente se apresentam os resultados, por zona do edifício, da percentagem de pessoas-hora por classe de conforto, de acordo com a ISO 7730, e o número de pessoas-hora insatisfeitas, por utilização do índice PPI.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Classe A	11,2	27,8	1,0	0,4	1,6
Classe B	30,4	13,7	40,6	41,2	39,9
Classe C	58,1	56,7	58,4	58,3	58,3
Classe D	0,4	1,7	0,1	0,1	0,2

Quadro 9.1. Percentagem de pessoas-hora em cada classe de conforto, por zona no sistema MU10211

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Total
Pessoa-hora insatisfeitas	1.741	420	4.095	3.425	3.182	12.864

Quadro 9.2. Valor esperado de insatisfeitos com o conforto com o sistema MU 10211

Para a obtenção dos resultados anteriores admitiu-se que o sistema de controlo de temperatura admite uma banda morta entre os 20 °C e os 24 °C, com um comportamento análogo ao estimado na simulação do edifício com o modelo Purchased Air. Os resultados apresentados são análogos aos do sistema com ventiloconvectores e a eficiência funcional do conforto térmico é igualmente unitária.

Relativamente à qualidade do ar interior, simulou-se a concentração de CO₂ com o programa anteriormente descrito. Para o efeito utilizaram-se 63 m³/(h·ps), com uma concentração exterior de CO₂ de 350 ppm, sendo a integração realizada com um passo de 0,25 h. Foram considerados dois sistemas, tal como nos sistemas com ventiloconvectores: um sistema A, com caudal constante, e um sistema B, com caudal de ar novo variável com a ocupação.

Em qualquer dos casos, o sistema permite que o caudal de ar novo entregue em cada espaço esteja de acordo com o preconizado, pelo que a eficiência funcional do sistema relativamente à qualidade do ar é unitária.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

As concentrações máximas de CO₂ em ppm, obtidas em cada zona para ambos os sistemas são apresentadas no quadro seguinte:

Sistemas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
A	648	614	652	652	652
B	652	634	652	652	652

Quadro 9.3. Concentração máxima de CO₂ por zona para o sistema MU 10211

Avaliou-se igualmente a cada hora e em cada zona a percentagem de insatisfeitos com a concentração de CO₂, determinando-se a partir destes valores o número de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas. O acumulado anual é apresentado no quadro seguinte:

Sistema	Total de pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas
A	12.141
B	13.816

Quadro 9.4. Pessoas·hora previsivelmente insatisfeitas com a concentração de CO₂

Finalmente, avaliou-se o consumo de energia do sistema, recorrendo-se ao programa de cálculo da energia no sistema com ventiloconvectores. De modo a tornar o sistema o mais simples possível prescindiu-se mesmo do sistema de recuperação assim como da variação de caudal nas bombas. Os estados das variáveis de controlo são apresentados no quadro seguinte, para os sistemas A e B:

Estado	cvv	cvb	rc	eff	dpmv	dpmb	clf	qcv	qcb	tev	eer	rch	ccpch	dtM	isl
Sistema A	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-0,6	-1	-1	-1
Sistema B	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-0,6	-1	-1	-1

Quadro 9.5. Estados das variáveis de controlo no sistema MU 10211

Apresenta-se no Quadro 9.6 as cargas de arrefecimento e de aquecimento do sistema, da UTAN e dos ventiloconvectores.

Comparando este sistema com um típico com ventiloconvectores, verifica-se um elevado aumento da carga de aquecimento a introduzir pelos ventiloconvectores, em duas ou três ordens de grandeza, consoante os casos; e uma redução das cargas associadas à UTAN.

Fisicamente, o MU 10211 difere de um sistema típico com ventiloconvectores por necessitar de baterias de aquecimento com potência análogas às de arrefecimento. Na simulação efectuada esta situação ocorre, em particular, na zona dois.

Sistema	QSist (-) [W·h]	QSist (+) [W·h]	QUTAN (-) [W·h]	QUTAN (+) [W·h]	QVC (-) [W·h]	QVC (+) [W·h]
A	4,15E+7	1,85E+7	3,53E+6	2,45E+6	3,43E+7	1,38E+7
B	4,31E+7	9,66E+6	2,96E+6	1,38E+6	3,65E+7	6,16E+6

Quadro 9.6. Cargas anuais de arrefecimento e de aquecimento no sistema MU 10211

Finalmente, determina-se os consumos de energia nos ventiladores de insuflação, de extracção, nos ventiloconvectores, nas bombas do primário e secundário e ainda no GPFC em modo de arrefecimento e de aquecimento, expressos no quadro seguinte.

Energia [W·h]	Vi	Ve	VC+Ve	BP+BS	EAF	EAQ	Total
Sistema A	2,82E+6	6,90E+5	2,37E+6	2,17E+6	8,21E+6	3,61E+6	1,99E+7
Sistema B	1,89E+6	4,62E+5	2,37E+6	2,06E+6	8,37E+6	1,78E+6	1,69E+7

Quadro 9.7. Energia anual despendida nos equipamentos do sistema MU 10211

Os resultados apontam para um sistema com um consumo de energia inferior a 2×10^7 W·h /ano, análogo ao consumo dos sistemas apresentados no capítulo sétimo que cumprem a eficiência funcional.

Ou seja, é possível definir um sistema independente, com informação nula, e que ao mesmo tempo tenha um baixo consumo de energia.

De acordo com a AP, do conjunto de sistemas independentes ou desacopláveis deve ser escolhido um sistema com informação nula. No âmbito deste trabalho, são desses tipos os sistemas com tectos arrefecidos sem sobre-arrefecimento do ar novo, sistemas com ventiloconvectores e sistemas com unidades de indução com reaquecimento. Tomando o caudal de ar novo determinado no capítulo oitavo e correndo de novo os programas descritos no capítulo sétimo, refez-se os resultados anteriormente apresentados no Quadro 7.33 apenas para estes sistemas, que são a seguir apresentados:

	Tipo de Sistema	Consumo Energia [W·h] x 10^{-7}	EF QAI (%)	PI (CO ₂)	EF Conforto (%)	PI (Conforto)
MU	A	1,99	100	12.141	100	12.864
MU	B	1,69	100	13.816	100	12.864
VC	A	2,12	100	12.141	100	12.909
VC	B	1,85	100	13.816	100	12.846
TCT	1	1,71	100	12.141	76,1	15.946
UI	2	1,95	100	11.481	100	15.375

Quadro 9.8. Resumo do consumo, qualidade do ar e conforto para os sistemas independentes que cumprem a informação de acordo com o capítulo oitavo

Excluindo-se o sistema de tectos arrefecidos que não cumpre os requisitos de conforto, a escolha do sistema a utilizar deve recair num dos restantes sistemas. Agora, sim, é possível ponderar as características dos sistemas. Se se pretender um baixo consumo de energia deve ser utilizado o sistema MU-B; se se pretender um baixo número de pessoas

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

insatisfeitas com a qualidade do ar devem ser utilizados os sistemas MU e VC com caudal de ar novo fixo, ou os sistemas com UI; finalmente se se der primazia ao conforto então devem ser escolhidos os sistemas com VC ou os MU.

O modelo MU surge assim como uma solução interessante que conjuga o baixo consumo de energia ao conforto térmico e à qualidade do ar interior.

9.5 Resumo e Conclusões

Neste capítulo, aplicou-se a Teoria Axiomática de Projecto ao sistema MU 10211. Este sistema difere de um sistema comum com ventiloconvectores, por utilizar o ar novo às condições exteriores numa ampla gama de temperaturas.

Deste modo, aproveita-se o arrefecimento gratuito do ar exterior. Como a média anual da temperatura do ar exterior ao longo do período de trabalho é de 18,5 °C e as temperaturas de conforto situam-se na gama entre os 20 °C e os 24 °C, há um potencial de arrefecimento no caudal de ar novo. Na realidade, necessitando um edifício de escritórios de arrefecimento ao longo de quase todo o ano, a introdução de ar novo à temperatura exterior é um factor de economia de energia.

Para além do consumo de energia, este sistema permite cumprir os requisitos de conforto térmico e de qualidade do ar em todas as zonas e em qualquer momento. Ou seja, trata-se de um sistema que garante uma eficiência funcional de 100% relativamente aos requisitos funcionais associados à qualidade do ar e ao conforto.

A comparação entre este sistema e os demais expostos, que garantem ambos os requisitos funcionais, leva a compará-lo apenas com os sistemas com VC ou os sistemas com UI com reaquecimento. Destes sistemas, o MU com caudal de ar variável apresenta o menor consumo de energia; os sistemas com UI apresentam o menor número de insatisfeitos com a qualidade do ar; os sistemas com VC e o MU apresentam os melhores resultados em termos de conforto térmico.

Face ao exposto, tendo-se visto que os sistemas não independentes necessitam de sistemas auxiliares que contrariem o seu funcionamento, proporíamos o seguinte enunciado universal:

Garantindo-se que os requisitos funcionais de um sistema são cumpridos num gama definida, há sempre um sistema independente que consome menos energia do que um sistema acoplado.

9.6 Contributos, Opinião e Prosseguimento

São contributos deste Capítulo o sistema MU 10211, por nós patenteado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial. São ainda contribuições a sua decomposição funcional e a avaliação do desempenho do sistema ao caso que tem servido de estudo. Esta avaliação foi realizada em termos de conforto térmico, de qualidade do ar e de consumo de energia.

Face aos resultados obtidos, parece ser possível obter sistemas simples, que garantam ao mesmo tempo o seu funcionamento nas gamas preconizadas e que tenham um baixo consumo de energia. Além disso, é expectável que este sistema tenha um custo de instalação menor que os analisados.

É ainda nossa opinião que a comunidade científica tem recorrentemente desenvolvido trabalhos de investigação sobre sistemas acoplados, pelo gozo intrínseco da resolução pontual de problemas difíceis. Este trabalho é muitas vezes recompensado pela actividade dos aparelhos de marketing, que preferem sistemas complexos a sistemas simples. Há, no entanto, que discutir as vantagens e desvantagens desta opção.

O desenvolvimento deste Capítulo poderá ser feito ao nível da concepção do sistema e ao nível da Teoria Axiomática de Projecto.

Relativamente à primeira linha de desenvolvimento, propõe-se os seguintes estudos:

Optimização do consumo de energia do sistema em função das temperaturas de insuflação em modo de arrefecimento e de aquecimento; variação do conjunto de variáveis de controlo de modo a avaliar quais os parâmetros mais relevantes em termos de consumo de energia; avaliação deste sistema noutras aplicações com cargas internas importantes, nomeadamente espaços comerciais; desenvolvimento de um sistema de controlo que permita a optimização do consumo de energia face às condições de utilização e às condições exteriores variando os parâmetros considerados relevantes; avaliação das características físicas dos ventiloconvectores para aplicação ao presente sistema; desenvolvimento de ventiloconvectores com velocidade constante.

Para o desenvolvimento da Teoria Axiomática de Projecto muito contribuiria a avaliação do enunciado universal antes exposto, através de casos de estudo de sistemas consumidores de energia.

Seria ainda interessante avaliar quais os custos e benefícios que o desenvolvimento e a investigação de sistemas acoplados têm para a Economia.

Anexo

Corolários e Teoremas da Teoria Axiomática de Projecto

1.1 Introdução

Alguns destes corolários e teoremas foram apresentados no Capítulo 2, por vezes implicitamente ao longo do texto. Neste anexo, serão apresentados os corolários da AP e os teoremas aplicáveis ao Projecto mecânico, traduzidos do Apêndice ao capítulo 2, do livro *Complexity, Theory and Applications* [Anexo.1]. Os teoremas relativos a projecto de organizações de grandes dimensões e ao projecto de *software* não foram transcritos propositadamente.

1.2 Corolários

Do axioma 1 obtém-se:

Corolário 1 – Se os RFs são acoplados ou tornaram-se interdependentes no processo de decomposição, deve desacoplar-se ou separar-se os componentes ou aspectos da solução.

Do axioma 2 derivam os corolários 2, 4 e 5:

Corolário 2 – Minimizar o número de RFs e de CSs.

Corolário 4 – Utilizar componentes *standard* ou intercambiáveis desde que compatíveis com os RFs e CSs.

Corolário 5 – Utilizar formas ou arranjos de componentes, simétricos, ou compatíveis com os RFs e CSs.

Conjugando os axiomas 1 e 2 obtém-se os corolários 3, 6 e 7:

Corolário 3 – Integrar num componente, diversos PPs se os respectivos RFs puderem ser satisfeitos independentemente.

Corolário 6 – Especificar a máxima tolerância possível na definição dos RFs.

Corolário 7 – Procurar uma solução independente com menor informação que uma solução acoplada.

Corolário 8 – A reangularidade efectiva de uma matriz escalar formada por um elemento é a unidade.

1.3 Teoremas sobre Projecto em Geral

Teorema 1 – Quando o número de DPs é menor que o número de RFs resulta que o projecto é acoplado ou que os RFs não podem ser satisfeitos.

Teorema 2 – Quando um projecto é acoplado por existirem mais RFs que PPs, pode ser desacoplado por adição de PPs, de modo que o número de PPs seja igual ao dos RFs, se um subconjunto da matriz de projecto de dimensão igual aos PPs iniciais for triangular.

Teorema 3 – Quando existem mais PPs que RFs, o projecto é redundante, o qual pode ser reduzido a um projecto independente, desacoplável ou acoplado.

Teorema 4 – Num projecto ideal, o número de PPs é igual ao número de RFs e os RFs são sempre mantidos independentes entre si.

Teorema 5 - Quando um dado conjunto de RFs é alterado por adição de um novo RF, por substituição de um RF por um novo, ou por selecção de um conjunto completamente novo de RFs, a solução de projecto dada pelos PPs originais não pode satisfazer o novo conjunto de RFs. Consequentemente, uma nova solução de projecto deve ser procurada.

Teorema 6 – O conteúdo de informação de um projecto independente não depende da sequência pela qual os PPs são alterados para satisfazerem um dado conjunto de RFs.

Teorema 7 – O conteúdo de informação de um projecto acoplado ou desacoplável depende da sequência pela qual os PPs são alterados para satisfazerem um dado conjunto de RFs.

Teorema 8 – Um projecto é desacoplável se o intervalo de especificação de projecto for superior a $\sum_{i \neq j}^n \frac{\partial RF_i}{\partial PP_j} \cdot \Delta PP_j$, caso em que os elementos fora da diagonal principal da matriz de

projecto podem ser desprezados nas considerações de projecto.

Teorema 9 – Para um produto ser fabricado com fiabilidade e robustez, a matriz de projecto, [A], (que relaciona o vector dos RFs com o vector dos PPs do produto), multiplicada pela matriz de processo para o processo de produção, [B], (que relaciona o vector dos PPs com o vector VPs do processo de produção), deve ser uma matriz diagonal ou triangular. Consequentemente, quando qualquer, [A] ou [B], representam um projecto acoplado, a independência dos RFs e um projecto robusto não podem ser alcançados. Quando [A] e [B] são matrizes triangulares, ambas devem ser triangulares inferior ou triangulares superior para que o processo de produção satisfaça a independência dos RFs.

Teorema 10 – Se a matriz de projecto puder ser dividida em submatrizes quadradas que tenham elementos significativos apenas na diagonal principal, então a reangularidade e a semangularidade da matriz de projecto são iguais ao produto das correspondentes medidas de cada uma das submatrizes.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Teorema 11 – A reangularidade e a semangularidade da matriz de projecto são invariantes com a ordem utilizada para os RFs e PPs, desde que essa ordem preserve a associação de cada RFs com o correspondente PPs.

Teorema 12 – A soma de informação de um conjunto de acontecimentos também é informação, desde que as correctas probabilidades condicionais sejam usadas quando o conjunto de acontecimentos não seja estatisticamente independente.

Teorema 13 – Se cada PP é probabilisticamente independente de outros PPs, o conteúdo de informação de todo o sistema é a soma da informação de todos os acontecimentos individuais associados com o conjunto de RFs, que tem de ser satisfeito.

Teorema 14 – Quando alguns RFs são alterados de um estado para outro no domínio funcional, a informação requerida para a mudança é superior num projecto acoplado que num projecto independente.

Teorema 15 – Quando o sistema de produção compromete a independência dos RFs do produto, ou o projecto do produto tem de ser modificado, um novo processo de produção tem de projectado e/ou usado para manter a independência dos RFs dos produtos.

Teorema 16 – Toda o conteúdo de informação que é relevante para o projecto é igualmente importante independentemente da sua origem física e nenhum factor de ponderação lhe deve ser aplicada.

Teorema 17 – Na ausência de informações completas, o projecto pode prosseguir somente no caso de um projecto desacoplável se as informações em falta forem relativas aos elementos fora da diagonal principal.

Teorema 18 – Há sempre um projecto independente ou desacoplável com menor informação que um projecto acoplado.

Teorema 19 – Um projecto independente e um projecto desacoplável são mais robustos que um projecto acoplado, no sentido que é mais simples reduzir o conteúdo de informação de projectos que satisfaçam o axioma da independência.

Teorema 20 – Se os intervalos de projecto de projectos independentes ou desacopláveis são contraídos, os projectos podem tornar-se acoplados. Reciprocamente, se os intervalos de projecto de alguns projectos acoplados forem alargados, os projectos podem tornar-se desacopláveis ou independentes.

Teorema 21 – Se a função densidade de probabilidade do RF no intervalo de projecto não é uniforme, a probabilidade de sucesso é igual a 1 quando o intervalo do sistema estiver dentro do intervalo do projecto.

Teorema 22 – Dados os valores máximos para os intervalos de projecto de um dado conjunto de RFs, projectos desacopláveis não podem ser tão robustos como projectos independentes, pois as tolerâncias permitidas para os PPs de um projecto desacoplável são menores que as de um projecto independente.

Teorema 23 – A tolerância permitida e, portanto, a robustez de um projecto desacoplável com uma matriz triangular totalmente significativa, diminui com o aumento do número de RFs.

Teorema 24 – Antes das sequências de movimentos de um robot, ou as de uma fábrica, serem optimizadas, o projecto das tarefas deve ser feito para satisfazer o teorema da independência pela adição de de-acopladores para eliminar os acoplamentos.

Os de-acopladores podem tomar a forma de fila ou de espaço de armazenagem.

Teorema 25 – Quando peças idênticas são processadas, um sistema de “empurrar” pode ser usado com de-acopladores para maximizar a produtividade, enquanto com peças de dimensões irregulares, que requerem diferentes operações de processamento, o sistema mais efectivo é o de “puxar”.

Teorema 26 – A incerteza associada a um projecto ou a um sistema pode ser reduzido significativamente alterando o projecto de complexidade combinatória para complexidade periódica.

1.4 Teoremas Relacionados com o Projecto e Decomposição de Grandes Sistemas

Teorema S1 – O processo de decomposição não afecta a performance global do projecto se os RFs de nível elevado e os CSs forem satisfeitos e o conteúdo de informação for nulo, independentemente do processo de decomposição específico utilizado.

Teorema S2 – Dois projectos “equivalentes” podem ter estruturas de custos substancialmente diferentes, muito embora realizem o mesmo conjunto de funções e até tenham o mesmo conteúdo de informação.

Teorema S3 – A qualidade do projecto depende da selecção dos RFs e do mapeamento de domínio para domínio. Selecções incorrectas de RFs feitas nos níveis mais elevados da hierarquia de projecto não podem ser rectificadas por decisões de projecto a níveis inferiores.

Teorema S4 – O melhor projecto para um sistema grande e flexível, que satisfaz um conjunto de RF, pode ser escolhido entre os projectos propostos que satisfaçam o axioma de independência, se o conjunto completo de subconjuntos de RFs que o sistema deve satisfazer durante toda a sua vida for conhecido *a priori*.

Teorema S5 – Quando o conjunto completo de subconjuntos de RFs, que um sistema grande e flexível deve satisfazer ao longo de toda a sua vida não é conhecido *a priori*, não há garantia que um projecto específico tenha sempre o mínimo de conteúdo de informação, para todos os possíveis subconjuntos, e, portanto, não há garantia que esse projecto é o melhor em qualquer tempo.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Teorema S6 – A probabilidade de escolher o melhor projecto de um sistema grande e flexível aumenta, quando o conjunto conhecido de subconjuntos de RFs se aproxima do conjunto completo, que se espera, o sistema encontre ao longo da sua vida.

Teorema S7 – Um sistema grande e flexível com adaptabilidade infinita (ou flexibilidade), pode não representar o melhor projecto, quando o grande sistema é utilizado em situações, nas quais, o conjunto completo de subconjuntos dos RFs que o sistema deve satisfazer, é conhecido *a priori*.

Teorema S8 – Um grande sistema não é necessariamente complexo se tiver uma elevada probabilidade de satisfazer os RFs especificados para o sistema.

Teorema S9 – A qualidade do projecto de um sistema grande e flexível é determinado pela qualidade da base de dados, pela correcta selecção de RFs e pelo processo de mapeamento.

1.5 Teoremas Relacionados com a Complexidade

Teorema C1 – A complexidade de um sistema independente¹ com muitas peças interligadas, não é necessariamente maior que a de um sistema com menos peças interligadas, a não ser que as interfaces entre as peças do sistema independente aumente a incerteza por redução da sobreposição entre o intervalo do sistema e o intervalo do projecto.

Teorema C2 – A complexidade de um sistema desacoplável com muitas partes interligadas, não é necessariamente maior que a de um sistema com menos peças interligadas, a não ser que as interfaces entre as peças do sistema desacoplável aumente a incerteza por redução da sobreposição entre o intervalo do sistema e o intervalo do projecto.

Teorema C3 – A complexidade de um sistema acoplado com muitas peças interligadas é maior que a de um sistema com poucas peças interligadas, porque qualquer variação nas interfaces entre as peças do sistema acoplado, aumenta a incerteza, por redução da sobreposição entre o intervalo do sistema e o intervalo do projecto.

Teorema C4 - A complexidade de um sistema independente com montagens complicadas, não é necessariamente maior que a de um sistema com menos montagens complicadas, a não ser que as interfaces entre as peças do sistema independente aumentem a incerteza por redução da sobreposição entre o intervalo do sistema e o intervalo do projecto.

Teorema C5 – A complexidade de um sistema desacoplável com montagens complicadas, não é necessariamente maior que a de um sistema com menos montagens complicadas das peças, a não ser que as interfaces entre as peças do sistema desacoplável

¹ Sublinhado para facilitar a leitura dos teoremas C1 a C6.

aumentem a incerteza por redução da sobreposição entre o intervalo do sistema e o intervalo do projecto.

Teorema C6 – A complexidade de um sistema acoplado com montagens complicadas é maior que a de um sistema com menos montagens complicadas das peças, porque qualquer variação nas interfaces entre as peças do sistema acoplado, aumenta a incerteza, por redução da sobreposição entre o intervalo do sistema e o intervalo do projecto.

Teorema C7 – A complexidade imaginária independente do tempo de um sistema desacoplável com montagens complicadas das peças pode aumentar, se os PPs não forem ajustados na sequência dada pela matriz de projecto.

Apêndice 1

Matriz de Projecto

1.1 Introdução

Este módulo ilustra como identificar as matrizes de projecto, por aplicação da teoria de grafos às relações entre requisitos funcionais e parâmetros de projecto.

Embora tenha sido realizado um programa com esse fim, a sua utilização neste trabalho não foi necessária. Na realidade, as relações entre funções e parâmetros ditaram que as matrizes surgissem na forma desejada, que facilmente permitiram identificar o tipo de projecto. Por esta razão este módulo foi colocado em Apêndice.

Tem, no entanto, aplicação ao estudo de projectos acoplados, ou mesmo a projectos aparentemente acoplados, em situações em que a reordenação das matrizes de projecto se afigura trabalhosa. Estas situações podem ocorrer mesmo em projectos com matrizes de pequena dimensão, como a seguir se verá.

A criação do algoritmo apresentado neste apêndice baseou-se num artigo de Taesik Lee [Apêndice 1.2]. Foi ainda desenvolvido um algoritmo de reordenação da matriz de projecto, para o caso de um projecto desacoplável e criado o algoritmo de álgebra de malhas.

Os programas realizados têm aplicação às matrizes de projecto da AP e ainda às do método de DSM, dado que a identificação de acoplamentos e ciclos são topologicamente iguais na AP e no método DSM.

Nos parágrafos seguintes, apresenta-se algumas noções básicas de grafos, assim como o algoritmo de classificação topológica de matrizes e a identificação de elementos que compõem um ciclo. A apresentação é acompanhada de um exemplo em que se ilustram os resultados do programa.

1.2 Noções de Grafos

Um grafo, G , é uma relação entre um conjunto de nós ou vértices, V , e um conjunto de arestas, A . Se as arestas forem não orientadas, o grafo diz-se não orientado. Se forem orientadas, o grafo diz-se dirigido ou digrafo tendo em cada aresta um nó de início e um nó de fim. As relações existentes entre os vértices são definidas pelas arestas orientadas.

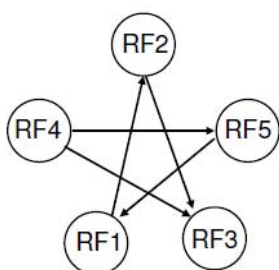


Figura A 1.1. Grafo orientado

Considere-se o grafo orientado presente da figura junta, onde se expressa as relações entre os nós RF. A título de exemplo, é visível que RF 1 se relaciona com RF 2 e recebe um fluxo de RF 5. Neste apêndice, designa-se por “a” o número de arestas e por “n” o número de nós.

O modo mais compacto de definir um grafo é através de uma matriz, [T], que contenha em cada linha os nós de início e de fim de cada aresta. Consequentemente, esta matriz tem dimensão (ax2).

As relações de um grafo podem também ser expressas por matrizes que relacionem cada nó com os restantes. A matriz que exprime estas relações, designa-se por matriz de adjacência [AD] e é uma matriz quadrada. Nesta matriz, se não existir uma relação do nó i para o j, os elementos correspondentes serão nulos; se existir essa relação, então o elemento (i,j) é 1 e a aresta é orientada de i para j. No caso do exemplo da Figura A 1.1, a matriz terá dimensão (5x5). Um elemento desta matriz será a seguir referido como $ad_{i,j}$. Estes elementos são obtidos da matriz [T] pela relação:

$$ad(T(k,1),T(k,2)) = 1, \quad k = 1,a \quad (1.1)$$

Para o exemplo referido, a matriz de adjacência será então:

$$AD = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad AD^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Por exemplo, o elemento $ad_{5,1}$ é 1 pois RF 5 liga a RF 1. Sendo [AD] a matriz cujos elementos significativos relacionam um nó com o nó mais próximo segundo uma aresta orientada, $[AD]^2$ conterà os elementos que relacionam cada nó com os que estão à distância de dois saltos. Com quatro saltos no grafo, só será possível ir do nó 4 para o nó 3. Com efeito, constata-se que $[AD]^4$ tem um único elemento significativo, o (4,3). O nó 4 será o início da rede, ou nó P_i , e o 3 o vértice mais afastado da rede.

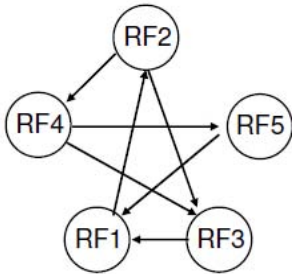
Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A matriz $[AD]^5$ será nula, ou seja, a profundidade da rede é de 4. Um grafo em que a sua matriz $[AD]^n$ é nula, diz-se em antenna e tem profundidade máxima $n-1$. Se $[AD]^n$ for não nula, então existe algum caminho que interliga algum nó genérico a ele próprio, ou seja existem ciclos. No exemplo dado não existem ciclos e o grafo diz-se acíclico. [Apêndice 1.2].

As potências das matrizes de adjacência podem também ser utilizadas para renumeração dos nós de uma rede em antenna. Esta é a base do algoritmo desenvolvido de reordenação da matriz de projecto. A linha 3 da matriz de adjacência $[AD]$ só contém zeros, ou seja o nó 3 não recebe qualquer informação com um salto, pelo que é um extremo.

Com as linhas a zeros das sucessivas potências de $[AD]$, podem identificar-se os nós que distam de um ou mais saltos dos extremos do grafo. A última linha a desaparecer será a do nó de início, ou nó P_i , neste caso a linha 4. Este algoritmo, quando aplicado à renumeração de uma matriz de um projecto desacoplado, coloca em cada coluna desta matriz os elementos imediatamente dependentes da função respectiva, obtendo-se uma matriz triangular inferior.

Num grafo em antenna, o número de arestas, a , é sempre igual a $n-1$, dado que a cada novo nó acrescentado, corresponde uma nova aresta. Se, de algum modo, forem interligados nós existentes desse grafo, forma-se uma malha, pelo que o número de malhas, m , será $m=a-(n-1)$ [Apêndice 1.1]. Do indicado, estas malhas não são orientadas. No caso do exemplo dado, o grafo tem uma malha, que não forma um ciclo devido à orientação das arestas.



Altere-se o grafo da figura anterior de modo a obter-se um grafo orientado cíclico. Para o efeito, crie-se novas relações de RF 3 para RF 1 e de RF 2 para RF 4. O grafo é, então, cíclico e $[AD]^5$ será não nula.

Figura A 1.2. Grafo orientado acíclico

Nas igualdades seguintes, indica-se a matriz de adjacência deste grafo $[AD]$ e, como exemplos, a sua segunda e quinta potências.

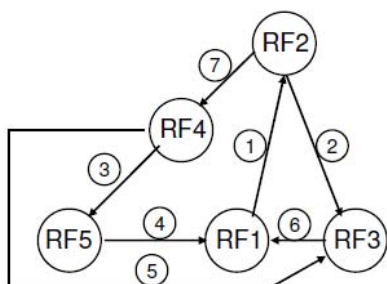
$$[AD] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [AD]^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [AD]^5 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Note-se p.e. o elemento (4,1) na matriz $[AD]^2$ que é igual a 2. Este valor indica que há dois caminhos com 2 saltos de RF 4 para RF 1. São eles o RF 4-RF 5-RF 1 e o RF 4-RF 3-RF 1.

Alterando a representação pictórica do grafo da Figura A 1.2 e numerando as arestas, obtém-se a figura a seguir representada, que representa o mesmo grafo. Nesta figura identifica-se facilmente os ciclos com as arestas 1-2-6 e 1-7-3-4 [Apêndice 1.2].

Devido à orientação das arestas, o caminho 5-6-4-3 não é um ciclo, embora forme uma malha. O grafo terá 3 malhas de acordo com a expressão anteriormente exposta:

$$m=7-(5-1)=3.$$



A interligação entre todos os nós pode ser feita por um conjunto de arestas, de menor dimensão que a apresentada no exemplo. Uma rede com as arestas 3-4-1-2, ou 7-5-6 e 3, poderia igualmente interligar os 5 nós. Estas redes em antena, que interligam todos os nós, designam-se por redes de recobrimento.

Figura A 1.3. Grafo orientado cíclico.

Qualquer aresta adicionada a esta rede, entre os nós previamente existentes, cria uma nova malha. Designa-se estas arestas por cordas, sendo portanto em número igual ao das malhas.

Existem diversos algoritmos de identificação da rede de recobrimento. Os mais conhecidos são os de escolha em profundidade ou em amplitude. Estes algoritmos são também utilizados para renumerar os nós. O primeiro consiste em marcar as arestas a partir de um nó inicial, P_i , até uma extremidade da rede. Depois, voltando atrás sucessivamente, renumera os nós e marca as arestas em falta. O segundo método renumera em cada passo os nós que se encontram à distância de um salto do nó corrente.

Um grafo pode também ser expresso por uma matriz que relacione as arestas com os nós. O número de cada coluna da matriz é o número da aresta. Em cada coluna, o nó de saída dessa aresta é assinalado com (-1) na linha da matriz correspondente ao nó, e a linha correspondente ao nó da outra extremidade é assinalada com (+1).

Esta matriz designa-se por matriz de incidência nó-troço, B. Caso seja definida a partir da matriz [T], a linha $T(k,1)$, $T(k,2)$ origina:

$$B(T(k,1),k)=-1 \text{ e } B(T(k,2),k)=+1 \quad (1.2)$$

Ou seja:

$$[B] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Na matriz $[B]$ apresentada, as primeiras quatro colunas são associadas à rede de recobrimento escolhida. Pode formar-se uma partição $[B_t]$, da matriz $[B]$, relativa à rede de recobrimento e uma $[B_c]$, da mesma matriz, relativa às cordas, ou $[B] = [B_t : B_c]$.

Numa rede de recobrimento renumerada, a informação do primeiro nó pode ser desprezada, por ligar a um nó conhecido, P_i . Eliminando a primeira linha de $[B]$ obtém-se a matriz $[B_t] = [B_{1,t} : B_{1,c}]$. De modo análogo, eliminando a primeira linha e coluna da matriz de adjacência, obtém-se a matriz de adjacência reduzida $[AD_1]$ de dimensão $(n-1)$. Esta matriz é igual a $[I] - [B_{1,t}]$, sendo $[I]$ a matriz identidade:

$$[B_{1,t}] = [I] - [AD_1] \quad (1.3)$$

A inversa de $B_{1,t}$ pode ser expressa por um desenvolvimento em série, sendo n o número de nós da rede:

$$[B_{1,t}]^{-1} = ([I] - [AD_1])^{-1} = [I] + [AD_1] + [AD_1]^2 + \dots + [AD_1]^{n-1} \quad (1.4)$$

Como uma potência k da matriz de adjacência, relaciona cada nó com aqueles que se situam a k saltos de distância, o somatório das potências é uma matriz de interligação entre todos os nós com qualquer número de saltos. Como o processo de renumeração de uma rede em antena, faz acompanhar a numeração dos nós com a das arestas, logo a inversa de $[B_{1,t}]$ representa todos os caminhos possíveis entre dois nós.

Usando esta matriz e a matriz de incidência das cordas, obtém-se todos os caminhos que se fecham com as cordas. Ou seja, obtém-se a matriz das malhas $[M]$ com o produto $[B_{1,t}]^{-1} \times [B_{1,c}]$. É comum apresentar a matriz $[M]$ com dimensão (m, a) , sendo m o número de ciclos. Colocando por ordem as cordas numa matriz identidade, obtém-se [Apêndice 1.3] :

$$[M] = -([B_{1,t}]^{-1} \cdot [B_{1,c}])^T : [I] \quad (1.5)$$

1.3 Matriz de Projecto e Grafos

Como indicado no Capítulo 2, a sequência de alteração dos PPs para ajustar os RFs, pode ser vista como um grafo entre os RFs.

Como exemplo, considere-se duas matrizes de projecto $[MP_1]$ e $[MP_2]$, com base respectivamente nos grafos das figuras anteriores. As relações entre os RFs e os PPs são assinaladas com 1, em vez da marca habitual X.

$$[MP_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad [MP_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

A existência de 1 no elemento a_{21} , em qualquer das matrizes, indica que RF 2 depende do PP1, ou de outro modo que a sua realização depende da realização prévia do RF 1. Pode afirmar-se que RF 1 precede RF 2, ou que existe um caminho entre ambos. Tomando a coluna 2 em ambas as matrizes de projecto, na primeira, ao RF 2 segue o RF 3; na segunda, ao RF 2 seguem RF 3 e RF 4.

Facilmente se verifica que entre a matriz de adjacência e a matriz de projecto existe a relação [Apêndice 1.2] :

$$[AD] = [MP]^T - [I] \quad (1.6)$$

Com base no exposto no ponto 1.2, é possível identificar a topologias das matrizes de projecto, dado que a relação entre RF e PP pode ser expressa num grafo.

1.4 Identificação de Topologias

As matrizes de projecto podem representar um projecto independente, desacoplável ou acoplado. Se o projecto for independente, então a matriz de projecto é uma matriz diagonal, matriz que é de simples identificação. Já a classificação de um projecto em acoplado ou desacoplado, com base na matriz de projecto, pode ser trabalhoso em função da forma como a matriz for apresentada. A matriz de projecto $[MP_1]$ indicada na secção anterior, representa um projecto desacoplável, mas uma primeira observação da matriz não evidencia este facto. A $[MP_2]$ representa um projecto acoplado. Nestes casos, para além da

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

identificação que o projecto é acoplado, tem interesse conhecer quais as relações que podem ser eliminadas para desacoplar o projecto.

Estas identificações topológicas podem ser feitas utilizando a potência de ordem n da matriz de adjacência. Se a matriz é não nula o projecto é acoplado sendo necessário avaliar os ciclos. Se o projecto não for acoplado, alguma potência de ordem p , igual ou inferior a n , da matriz de adjacência é nula. A potência da matriz de adjacência de ordem $p-1$ conterá os extremos da rede, sendo que os índices de linha indicam os nós de entrada e os índices de coluna os nós extremos da rede.

Utilizando o algoritmo baseado nas potências das matrizes de adjacência, é possível renumerar a rede de modo a obter-se uma matriz de projecto triangular inferior. É necessário ter em atenção a tabela de renumeração, de modo a permutar correctamente os RF. Para o caso do projecto da matriz MP_1 , apresenta-se em (1.7) a equação de projecto reordenada:

$$\begin{bmatrix} RF4 \\ RF5 \\ RF1 \\ RF2 \\ RF3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} PP4 \\ PP5 \\ PP1 \\ PP2 \\ PP3 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

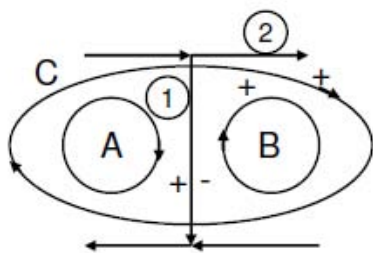
1.5 Identificação de Acoplamentos

Se o projecto for acoplado, existem ciclos no grafo respectivo, que podem ser determinados recorrendo à equação (1.5). Neste parágrafo, expõe-se um algoritmo que identifica os ciclos e propõe a eliminação de algumas relações entre RFs e PPs. Para o caso da matriz de projecto $[MP_2]$, a matriz das malhas (m_l, a) será:

$$[M] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Esta matriz identifica as três malhas existentes, sendo que a primeira encontra as arestas 1-2-3 e 4 no sentido contrário à sua orientação.

Estas malhas podem ter diversas topologias. Dependente do modo de entrada dos dados, a aplicação da equação (1.5) pode identificar malhas diferentes. Por combinação linear das malhas identificadas, obtém-se as várias topologias das malhas existentes. Geralmente, são possíveis de obter por combinação linear das malhas duas a duas, situação possível desde que tenham pelo menos um troço comum.



Considere-se o esquema do grafo indicado na Figura A 1.4, onde as malhas mais pequenas A e B têm a aresta 1 em comum e B e C têm, pelo menos, em comum a aresta 2. A matriz das malhas na linha de A terá +1 no elemento correspondente à aresta 1; para a mesma aresta a linha da malha B será -1.

Figura A 1.4. Combinação de ciclos

A coalescência da malha A com a B levaria a eliminar o troço 1, originando, por hipótese, a malha C. Assim, a identificação da malha C na matriz M, é obtida da soma das linhas de A e de B. Um raciocínio análogo pode ser feito se as malhas identificadas fossem B e C. Ambas encontram a aresta 2 no sentido positivo, pelo que as respectivas linhas em [M] serão +1. A sua coalescência daria por hipótese, A, caso em que as linhas B e C teriam de ser diminuídas. Serão ciclos as malhas que encontrem as arestas sempre no mesmo sentido. Para o exemplo da matriz de projecto [MP₂], obtém-se a matriz dos ciclos:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A eliminação de qualquer das arestas corresponde a eliminar uma relação entre um RF e um PP abrindo o ciclo respectivo. A avaliação das relações a tentar eliminar depende da facilidade de substituição de um PP por outros. Sem ponderar essa facilidade, uma possível abordagem consiste em eliminar arestas que pertençam a dois ciclos, preferencialmente a ciclos com o menor número de arestas.

A aplicação deste conceito ao exemplo implicaria a eliminação do troço 1, tornando o projecto desacoplado. Então, resultaria a equação de projecto:

$$\begin{bmatrix} \text{RF } 2 \\ \text{RF } 4 \\ \text{RF } 5 \\ \text{RF } 3 \\ \text{RF } 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{PP } 2 \\ \text{PP } 4 \\ \text{PP } 5 \\ \text{PP } 3 \\ \text{PP } 1 \end{bmatrix}$$

Que evidencia que o projecto é desacoplável.

1.6 Programa de Identificação

Realizou-se um programa “cmd_Matrix_graph.m” que aborda as matérias anteriormente expostas. O programa recebe a matriz T, verifica se tem erros e analisa se o projecto é independente.

Se não for, obtém a matriz de adjacência. De seguida, com base nas potências da matriz de adjacência determina se o projecto é desacoplável ou se é acoplado. No primeiro caso reordena a matriz de modo a surgir na forma de uma matriz triangular; no segundo caso determina a matriz de incidência nó-troço, B, a partir de T. Com B determina a matriz da malhas M e indica possibilidades de desacoplar o projecto. As possibilidades de desacoplar são obtidas apenas por combinações dos ciclos obtidos dois a dois.

A sequência seguinte indica os principais passos deste programa:

cmd_Matrix_graph.m

Introduz T

Se vazia: Projecto independente

Caso contrário

Validacao.m : verifica se os elementos da matriz são numéricos, inteiros e positivos, e se a matriz tem duas colunas e pelo menos 2 linhas.

adjac.m: Calcula a AD usando a Equação (1.1)

PotAdiac.m: Determina as potências de AD

Se $\text{norma}(AD^n)=0$: o projecto é desacoplado e marca o nó Pi

Se $\text{norma}(AD^n)<>0$: o projecto é acoplado

Se desacoplado:

renumAd.m: Identifica as linhas de AD^p que são nulas

verifica e junta os elementos que ainda não estão na matriz renumerada

traducao.m: Relaciona os novos índices com os anteriores

Usando a Equação (1.6) determina a matriz de projecto

Se acoplado:

ciclos.m:

incidencia.m: Determina B usando a Equação (1.2)

grMinSpanTree.m: Determina a rede de recobrimento (Programa do MatLab)

incT_C.m: Usa a rede de recobrimento para obter $B_{1,t}$ e $B_{1,c}$

Obtém M usando a Equação (1.5)

CombCycles2.m: Combina os ciclos de M dois a dois

Se têm um lado comum em

Igual sentido: diminui

Sentido diferente: soma

CombColunas.m: Identifica na matriz de combinação dos ciclos, quais as colunas, ou troços, que ocorrem em mais de um ciclo.

Apêndice 2

Conjuntos Vagos

2.1 Introdução

O conhecimento, ou a opinião sobre um assunto, são muitas vezes expressas de forma linguística, não precisa. É comum haver expressões de “está frio”, ou “está quente”, sem que se precise a temperatura. Este tipo de expressões ocorre nas definições de ergonomia e, portanto, também quando alguém se manifesta relativamente ao grau de satisfação relativamente ao ambiente criado por um sistema de climatização.

Zadeh (1965) propôs a teoria de conjuntos vagos, que permite realizar operações lógicas com expressões linguísticas e, conseqüentemente, conduzir a conclusões.

Para um determinado Universo de discurso são criados conjuntos não mutuamente exclusivos, que definem as possíveis expressões linguísticas. Por exemplo, pode ser definida a colecção: {“muito frio”, “frio”, “algo frio”, “neutro”, “algo quente”, “quente”, “muito quente”}. Cada elemento deste conjunto é definido num intervalo, por um conjunto de valores associados a uma função, que espelha a maior ou menor graduação da pertença deste valor ao conjunto. Enquanto na teoria de conjuntos um elemento ou pertence a um conjunto ou não pertence, nos conjuntos vagos um elemento tem um grau de pertença ao conjunto, podendo ao mesmo tempo pertencer e não pertencer. O conceito de pertença é no entanto próximo do conceito de probabilidade. Em termos dos axiomas que lhes dão origem, a diferença entre a abordagem probabilística e a de conjuntos vagos reside no axioma do terceiro excluído [Apêndice 2.1].

2.2 Operações com Conjuntos

Um conjunto A é definido num intervalo de um universo X , designado por Universo de discurso. A cada elemento x desse intervalo está associado um valor de pertença $\mu_A(x)$. Esta função de pertença é definida entre 0 e 1, sendo 0 a não pertença a A e 1 a pertença a A . Outro qualquer valor quantifica uma graduação de pertença. Em conjuntos vagos são definidas as operações de reunião, intersecção e complementar, de acordo com a equação (2.1) e a Figura A 2.1:

$$\begin{aligned}\mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ \mu_{\bar{A}}(x) &= 1 - \mu_A(x)\end{aligned}\quad (2.1)$$

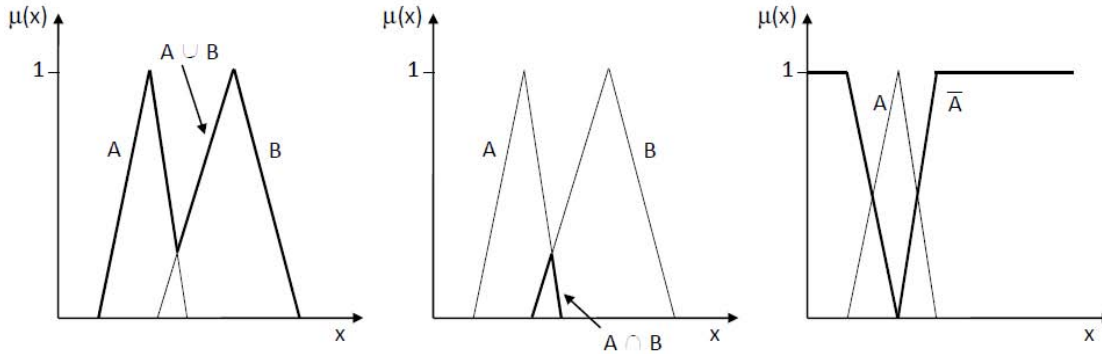


Figura A 2.1. Função pertença e operações com conjuntos

2.3 Implicação

Seja A um conjunto pertencente a um Universo X e B outro conjunto de um outro Universo Y. Podem ser enunciadas proposições P e Q com os elementos $x \in X$ e $y \in Y$.

Com a composição de proposições podem formar-se tautologias, entre as quais figuram o *modus ponens*. Esta tautologia permite inferir afirmações de proposições dadas.

Sejam as proposições: $P = \{x \in A, x \in X \text{ e } A \subset X\}$ e $Q = \{y \in B, y \in Y \text{ e } B \subset Y\}$.

Afirme-se a implicação: $P \rightarrow Q$. É equivalente a dizer-se: se A então B, ou de outro modo se existe A, existe B, e se não existe A, pode ou não existir B. Ou, com o auxílio de um diagrama de Venn, a relação pode ser expressa por $R = (A \cap B) \vee (\bar{A} \cap Y)$. Em conjuntos vagos, X e Y são os universos de discurso, sendo A o conjunto dos antecedentes e B o dos consequentes. A implicação Max-Min de Zadeh é um exemplo da implicação descrita pela expressão R, com utilização de conjuntos vagos:

$$\mu_R(x, y) = \max(\min(\mu_A(x), \mu_B(y)), (1 - \mu_A(x))) \quad (2.2)$$

O operador de Max-Min de Zadeh assemelha-se ao processo de raciocínio. Podem ser utilizadas outras implicações no espaço cartesiano (X,Y), nomeadamente o operador de implicação de mínimo de Mamdani e a de produto de Larson, respectivamente:

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.3)$$

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (2.4)$$

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

A primeira é utilizada se for necessário que ambas as condições sejam obrigatórias. A segunda retrata situações em que a pertença do consequente é afectada proporcionalmente pela pertença do antecedente. Ou seja, a implicação é obtida da afectação de μ_B por um factor de escala μ_A . Esta regra tende a diminuir a influência conjunta para valores pequenos de pertença a A e a B.

O conhecimento do operador de implicação R permite obter conclusões de qualquer outro conjunto $A' \subset A$, sendo $B' = A' \circ R$, com $B' \subset B$.

2.4 Graduação de Conjuntos¹

Designa-se por graduação de conjuntos vagos as operações necessárias à obtenção da função de pertença, f.p., associada a esse conjunto. Na Figura A 2.1, a função de pertença foi apresentada com a forma triangular. É, ainda, comum a utilização de outras funções, nomeadamente a trapezoidal ou a sigmoideal. A escolha da forma da f.p. depende da estimativa sobre a forma da função. As funções de pertença podem ainda ser determinadas por comparação de variáveis valor a valor, com o apoio de matrizes de Saaty, por utilização de redes neuronais ou por algoritmos genéticos [Apêndice 2.1].

A definição do domínio depende sempre da variação física da variável no Universo de discurso.

Por vezes, a variável pretendida é expressa função de outras, das quais se conhecem as funções de pertença. Nestes casos, interessa realizar operações com conjuntos vagos, baseadas nas quatro operações básicas.

Sejam então u e v duas variáveis, definidas num universo de discurso X, das quais se conhecem as funções de pertença $\mu_u(x)$ e $\mu_v(x)$, de acordo com a Figura A 2.2

As operações matemáticas são efectuadas ao mesmo nível de pertença α , designado por corte α . Seja a_u e b_u os limites inferior e superior de x, para um corte α na função $\mu_u(x)$ e a_v e b_v os correspondentes limites inferior e superior na função $\mu_v(x)$. A soma das duas funções de pertença ocorre por soma dos limites inferior e superior, conforme indicado na figura junta.

¹ Utilizado normalmente o termo *fuzzificar*, anglicismo comum para designar o processo.

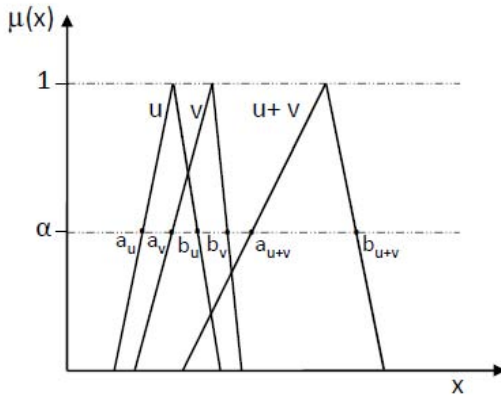


Figura A 2.2. Soma de números vagos

As restantes operações básicas são facilmente intuídas. Para cada corte α serão calculadas pelas equações descritas em (2.5):

$$\begin{aligned}
 v + u : & \quad a_{v+u} = a_v + a_u, \quad b_{v+u} = b_v + b_u \\
 v - u : & \quad a_{v-u} = a_v - b_u, \quad b_{v-u} = b_v - a_u \\
 v \cdot u : & \quad a_{v \cdot u} = a_v \cdot a_u, \quad b_{v \cdot u} = b_v \cdot b_u \\
 v / u : & \quad a_{v/u} = a_v / b_u, \quad b_{v/u} = b_v / a_u
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

2.5 Simulação com Conjuntos Vagos

O comportamento de um sistema pode ser simulado, processando os dados de entrada com as funções que o representam. Na teoria de conjuntos vagos, os dados de entrada são definidos por uma colecção de conjuntos designados por antecedentes: A^k , $k=1,n$ no universo de discurso X , sendo n o número de conjuntos. A cada conjunto A^k está associada uma função de pertinência $\mu_{A^k}(x)$. O resultado é obtido no universo de discurso Y , por outra colecção de conjuntos consequentes B^p de cardinal m , com funções $\mu_{B^p}(x)$, determinadas por um conjunto q de regras $\mu_{R^q}(x)$.

Utilizando duas colecções de antecedentes A_1 e A_2 a inferência do comportamento do sistema pode ser dado por um único conjunto de consequentes B . As relações entre antecedentes e consequentes são a implicação, expressa numa tabela de conjunção.

Sejam $A_1=\{A_{1b}, A_{1m}, A_{1a}\}$ e $A_2=\{A_{2b}, A_{2a}\}$ os antecedentes e $B=\{B_b, B_a\}$ o consequente. A implicação poderá ser expressa pelo quadro:

	A_{1b}	A_{1m}	A_{1a}
A_{2b}	B_b	B_b	
A_{2a}		B_a	B_a

Quadro A 2.1. Exemplo de implicação entre antecedentes e consequentes

Para um par de valores $(a_1, a_2) \in (A_1, A_2)$, com pertença $(\mu_{A_1}(a_1), \mu_{A_2}(a_2))$, a conjunção definida na tabela origina $\mu(a_1, a_2)$, que geralmente é determinada por $\mu(a_1, a_2) = \min(\mu_{A_1}(a_1), \mu_{A_2}(a_2))$. O grau de pertença à conjunção, $\mu(a_1, a_2)$, também designado por grau de preenchimento, é um conjunto de valores determinados², neste caso com cardinal 4.

Cada valor actuará em B em função do operador de implicação definido. No caso do operador de Larson, cada um dos quatro valores obtidos actuará como factor de escala nas funções de pertença μ_B , gerando quatro funções de pertença, $\mu_{B_i}, i=1,4$. Estas funções são agregadas de modo a obter-se uma única função vaga de saída.

A agregação, sendo uma reunião de possibilidades, é normalmente obtida por recurso ao máximo, ou $\mu_B(a_1, a_2) = \max_{i=1,4} (\mu_{B_i})$. A escolha de um valor determinado como reflexo do funcionamento do sistema é feita, normalmente, por uma medida central da f.p. É comum utilizar-se a média para definir o estado de resposta do sistema.

O processo pode ser resumido nos seguintes passos [Apêndice 2.2]:

- Graduar os conjuntos de entrada;
- Aplicar um operador;
- Aplicar uma operação de implicação;
- Agregar as saídas;
- Desgraduar o conjunto, por aplicação de uma medida central.

² Normalmente designados por valores *crisp*, de acordo com a literatura anglo-saxónica.

Bibliografia

Apresentam-se de seguida duas tabelas. Uma com a bibliografia ordenada por capítulo e referência, a outra por autor, capítulo e referência. No texto, as referências bibliográficas foram referenciadas sequencialmente na forma [Capítulo.Ref].

Tabela B1. Bibliografia ordenada por capítulo e referência (Ref)

Capítulo	Ref	Autor
1	1	Terence Love, "Constructing a coherent cross-disciplinary body of theory about designing and design: some philosophical issues", <i>Design Studies</i> , Vol. 23, n. 3, (345-361), 2002.
1	2	Thomas Kuhn, <i>A Estrutura das Revoluções Científicas</i> , Debates Ciência, Perspectiva, 8ª Edição, 1970 (primeira edição em 1962).
1	3	Karl R. Popper, <i>O Mito do Contexto</i> , Biblioteca de Filosofia Contemporânea, Edições 70, 1996 (com base em conferências de Popper de 1959, 1963 e 1965).
1	4	Vladimir Hubka, W. Ernst Eder, <i>Design Science</i> , Springer-Verlag London Limited, 1996 (versão original de 1992).
1	5	Jo Ritzen, "Universities and Innovation, Managing and Promoting Innovation", XX IASP World Conference on Science and Technology Parks, Lisbon, 2003.
1	6	Karl Popper, <i>A Lógica da Pesquisa Científica</i> , Editora Pensamento Cultrix, 17ª Edição, 1972 (primeira edição em 1959).
1	7	António Damásio, <i>O Erro de Descartes, Emoção, Razão e Cérebro Humano</i> , 21ª Edição, 1995.
1	8	Auguste Comte, <i>Cours de Philosophie Positive</i> , Classiques Garnier, edição sem data, (primeira edição 1826-1830).
1	9	Michael Ruse, <i>O Mistério de todos os Mistérios</i> , edições Quasi, 2002 (primeira edição em 1999).
1	10	Michel Foucault, <i>A Arqueologia do Saber</i> , Editora Almedina, 2005 (primeira edição Éditions Gallimard, 1969).
1	11	John P. van Gigch, "Comparing the Epistemologies of Scientific Disciplines in Two Distinct Domains: Modern Physics versus Social Sciences. I. The Epistemology and Knowledge Characteristics of the Physical Sciences", <i>Systems Research and Behavioural Science</i> , Vol. 19, n. 3, (199-209), 2002.
1	12	J. Eekels, "On the fundamentals of engineering design science: The geography of engineering design science. Part 1", <i>Journal of Engineering Design</i> , Vol 11, n. 4, (377-397), 2000.
1	13	John P. van Gigch, "Comparing the Epistemologies of Scientific Disciplines in Two Distinct Domains: Modern Physics versus Social Sciences. II. The Epistemology and Knowledge Characteristics of the 'New' Social Sciences", <i>Systems Research and Behavioural Science</i> , Vol. 19, n. 6, (551-562), 2002.

Bibliografia

Capítulo	Ref	Autor
1	14	J. Eekels, "On the fundamentals of engineering design science: The geography of engineering design science. Part 2", <i>Journal of Engineering Design</i> , Vol 12, n. 3, (255-281), 2001.
1	15	Semyon D. Savransky, <i>Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving</i> , CRC Press, 2000.
1	16	Stuart Pugh, <i>Total Design, Integrated Methods for Successful Product Engineering</i> , Pearson Education Limited, 1990.
1	17	Genichi Taguchi, <i>Taguchi on Robust Technology Development, Bringing Quality Upstream</i> , ASME, 1995 (publicação original em 1990).
1	18	European Commission, Value Management, Handbook, Report EUR 16096, DGXIII, 1995.
1	19	G. Pahl e Beitz, <i>Engineering Design, a Systematic Approach</i> , second edition, Springer, 2001 (primeira edição em 1995).
1	20	Nam P. Suh, <i>The Principles of Design</i> , Oxford University Press, 1990.
1	21	Miguel Cavique, Paulo Madeira Costa, "Contributo para a Aplicação da "Análise do Valor" a Instalações de Climatização", CIAR 99, Lisboa, 1999.
1	22	Don Clausing, <i>Total Quality Development</i> , ASME Press, 1994 (primeira edição em 1988).
2	1	Nam P. Suh, <i>The Principles of Design</i> , Oxford University Press, 1990.
2	2	Nam P. Suh, <i>Axiomatic Design: Advances and Applications</i> , Oxford University Press, 2001.
2	3	AMM Sharif Ullah, "F-Granular Design Information Based Information Axiom", Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2002.
2	4	European Commission, Value Management, Handbook, Report EUR 16096, DGXIII, 1995.
2	5	A.M. Gonçalves-Coelho, António J.F. Mourão, "Axiomatic design as support for decision-making in a design for manufacturing context: A case study", <i>International Journal of Production Economics</i> , Vol. 109, n. 1-2, (81-89), 2007.
2	6	Christopher A. Brown, "Kinds of Coupling and Approaches to Deal with them", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	7	Taesik Lee, Peter N. Jeziorek, "Understanding the value of eliminating an off-diagonal term in a design matrix", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	8	A.J.Osiadacz, <i>Simulation and Analysis of Gas Networks</i> , E&FN SPON, 1987.
2	9	Nam P. Suh, <i>Complexity, Theory and Applications</i> , Pappalardo Series in Mechanical Engineering, Oxford University Press, 2005.
2	10	A.M. Gonçalves-Coelho, A.J.F. Mourão, "Axiomatic Design: The Role of the Second Axiom", <i>Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Publicat de Universitatea Tehnica Gh. Asachi Iasi</i> , Tomul L (LIV), Fasc. V c, Sectia, Constructii de Masini, 2004.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
2	11	Hilario L. Oh, "Amending Axiom II to Achieve a Six Sigma Design", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	12	Daniel D. Frey, Ebad Jahangir, Fredrik Engelhardt, "Computing the Information Content of Decoupled Designs", <i>Research in Engineering Design</i> , Vol. 12,n. 2, (90-102), 2000.
2	13	Gwang-Sub Shin, Sang-Il Yi, Gyung-Jin Park, Jeong-Wook Yi, Yong-Deok Kwon, "Calculation of Information Content in Axiomatic Design", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
2	14	Basem El-Haik, "An Integer Programming Formulation For The Concept Selection Problem With An Axiomatic Perspective (Part II): Fuzzy Formulation", First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2000.
2	15	Michele Pappalardo, "Fusion of Belief in Axiomatic Design", 4 th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	16	Alessandro Naddeo, "Axiomatic Framework Applied to Industrial Design Problem Formulated by para-Complete Logics Approach: The Power of Decoupling on Optimization Problem Solving", 4 th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	17	Nicola Cappetti, Alessandro Naddeo, Arcangelo Pellegrino, "Design Decoupling Method Based on Para-Complete Logics", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
2	18	Osman Kulak, Sule Itir Satoglu, M. Bulent Durmusoglu, "Multi-attribute Material Handling Equipment Selection Using Information Axiom", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
2	19	Miguel Cavique, António Freire Mourão, António M. Gonçalves-Coelho, "Reducing Complexity in Outdoor Air System", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, Itália, 2006.
2	20	Nam P. Suh, "Complexity in Engineering", Dn Keynote Paper, <i>The Park Centre for Complex Systems, MIT</i> , 2005.
2	21	Gwang-Seob Shin, Gyung-Jin Park, "Decoupling Process of a Coupled Design using the Triz Module", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florence, 2006.
2	22	Young Ju Kang, "The Method for Uncoupling Design by Contradiction Matrix of Triz, and Case Study", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
2	23	M.D. Guenov, S.G. Barker, "Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the Decomposition of Engineering Systems", <i>Systems Engineering</i> , Vol. 8, n.1, (29-40), 2004.
2	24	Andrea Del Taglia, Gianni Campatelli, "Axiomatic Design & QFD: A Case Study of a Reverse Engineering System for Cutting Tools", 4 th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	25	A. Kerim KAR, "Linking Axiomatic Design and Taguchi Methods Via Information Content in Design", First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2000.
2	26	Denis Cavallucci, Philippe Lutz, "Intuitive Design Method (IDM), a new Approach on Design Methods Integration", First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2000.

Bibliografia

Capítulo	Ref	Autor
2	27	Allan L. Dickinson, "Integrating Axiomatic Design into a Design for Six Sigma Deployment", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	28	George E. Dieter, <i>Engineering Design, a Materials and Processing Approach</i> , McGraw-Hill International Editions, 2000.
2	29	António M. Gonçalves-Coelho, "Axiomatic Design and the Concurrent Engineering Paradigm", <i>Academic Journal of Manufacturing Engineering</i> , Vol 2, n. 2, 2004.
3	1	ASHRAE, <i>ASHRAE Handbook</i> , "Fundamentals, Chapter 8 - Thermal Comfort", 2005.
3	2	ASHRAE, Standard 55: 2007, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
3	3	ISO 11079: 2007, Ergonomics of the thermal environment - Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects.
3	4	ISO 7243: 1989, Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature).
3	5	ISO 7933: 2004, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
3	6	ISO 8996: 2004, Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate.
3	7	ISO 7730: 2005, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
3	8	Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, "Comparação entre sistemas de ar condicionado", Climamed, Madrid, 2005.
3	9	C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus and E. Arens, "Air Quality and Thermal Comfort in Office Buildings: Results of a Large Indoor Environmental Quality Survey", Healthy Buildings, Lisboa, 2006.
3	10	Miguel Cavique, "Inquérito ao conforto térmico e comparação com os resultados da EN ISO 7730", II Jornadas Técnicas da EFRIARC, Coimbra, 2002.
3	11	Richard J. de Dear, Gail Schiller Brager, "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference", <i>ASHRAE transactions</i> , 1998.
3	12	J.F. Nicol, M.A. Humphreys, "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34, n. 6, (563-572), 2002.
3	13	Michael A. Humphreys, J. Fergus Nicol, "The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34,n. 6 (667-684), 2002.
3	14	Ole Fanger, Jorn Toftum, "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34, n. 6, (533-536), 2002.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
3	15	R. Brandão et al., “The new research centre of the Brazilian Petroleum Company in Rio de Janeiro, Brazil: The achievements in the thermal performance of air-conditioned buildings in the tropics”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 10, (1917-1930), 2008.
3	16	B. Moujalled, R. Cantin and G. Guarracino, “Adaptive thermal comfort evaluation in a field study”, International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece, 2005.
3	17	Joost van Hoof, Jan L.M. Hensen, “Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 1, (156-170), 2007.
3	18	Stefano Schiavon, Arsen K. Melikov, “Energy saving and improved comfort by increased air movement”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40. n.10, (1954-1960), 2008.
3	19	H.B. Rijal, P. Tuohy, F. Nicol, M.A. Humphreys, A. Samuel and J. Clarke, “Development of an adaptive window-opening algorithm to predict the thermal comfort, energy use and overheating in buildings”, <i>Journal of Building Performance Simulation</i> , Vol. 1, n. 1, (17-30), 2008.
3	20	Edward Arens, Stephen Turner, Hui Zhang, Gwelen Paliaga, “Moving Air for Comfort”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 5, 2009.
3	21	Yongmin Yan, Jin Zhou, Yaolin Lin, Wei Yang, Ping Wang, Guoqiang Zhang, “Adaptive optimal control model for building cooling and heating sources”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 8, (1394-1401), 2008.
3	22	Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes, “Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 7, (1353-1365), 2008.
3	23	Michael A. Humphreys, Mary Hancock, “Do people like to feel ‘neutral’? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 7, (867-874), 2007.
3	24	Fergus Nicol, Michael Humphreys, “Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort”, <i>Solar Energy</i> , Vol. 81, n. 3, (295-304), 2007.
3	25	CEN, EN 15251: 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
3	26	F. Nicol, L. Pagliano, “Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN 15251”, 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 2007.
3	27	ASHRAE, ASHRAE Standard 62.1: 2007, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
3	28	Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei nº 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, 2006.
3	29	M. Santamouris et al., “Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 10(1833-1843), 2008.

Bibliografia

Capítulo	Ref	Autor
3	30	M. Griffiths , M. Eftekhari, "Control of CO2 in a naturally ventilated classroom", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 4, (556-560), 2007.
3	31	K.W. Mui, L.T. Wong , W.Y. Chan, "Energy impact assessment for the reduction of carbon dioxide and formaldehyde exposure risk in air-conditioned offices", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 8, (1412-1418), 2008.
3	32	Nicolas L. Gilbert, et alii, "Air change rate and concentration of formaldehyde in residential indoor air", <i>Atmospheric Environment</i> , Vol. 42, n. 10, (2424-2428), 2008.
3	33	Tom Marsika, Ron Johnson, "HVAC air-quality model and its use to test a PM 2.5 control strategy", <i>Building and Environment</i> , 43, (1850-1857), 2008.
3	34	Nakorn Tippayawong, et alii, "Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments", <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 11, (188-197), 2009.
3	35	NE Klepeis, WW Nazaroff, "Characterizing size-specific ETS particle emissions", Indoor Air, Monterey, CA, USA, 2002.
3	36	Da Yan et alii, "An integrated modeling tool for simultaneous analysis of thermal performance and indoor air quality in buildings", <i>Building and Environment</i> , Vol. 43, n. 3 (287-293), 2008.
3	37	James L. Repace, Kenneth C. Johnson, "Can Displacement Ventilation Control Secondhand ETS?", <i>ASHRAE IAQ Applications</i> , 2006.
3	38	L. Alevantis, J. Wagner, W. Fisk, D. Sullivan, D. Faulkner, L. Gundel, J. Waldman, P. Flessel, "Design for smoking rooms", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 45, n. 7 , 2003.
3	39	Olivier Lazcka, F. Javier Del Campo, F. Xavier Muñoz, "Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors", <i>Biosensors and Bioelectronics</i> , Vol. 22, n. 7, (1205-121), 2007.
3	40	Verein Deutscher Ingenieure, VDI 6022: 2006, Hygiene requirements for ventilation and air-conditioning systems and units.
3	41	Feng Lia, Jianlei Niua, Lizhi Zhang, "A physically-based model for prediction of VOCs emissions from paint applied to an absorptive substrate", <i>Building and Environment</i> , Vol. 41, n. 10, (1317-1325), 2006.
3	42	Chuck Yu, Derrick Crumpt, "A Review of the Emission of VOCs from Polymeric Materials used in Buildings", <i>Building and Environment</i> , Vol. 33, n. 6, (357-374), 1998.
3	43	Abdeen Mustafa Omer, "Renewable building energy systems and passive human comfort solutions", <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , Vol. 12, n. 6, (1562-1587), 2008.
3	44	H.N. Knudsen, P. Wargocki, J. Vondruskova, "Effects of Ventilation on Perceived Quality of Air Polluted by Building Materials – a Summary of Reported Data", Healthy Buildings, Lisboa, 2006.
3	45	CEN, EN 13779: 2007, Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
3	46	CEN, CR 1752: 1998, Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment.
3	47	P. Wargocki, P.O. Fanger, P. Krupicz, A. Szczecinski, "Sensory pollution loads in six office buildings and a department store", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 10, (995-1001), 2004.
3	48	Pawel Wargocki, Zsolt Bako-Biro, Geo Clausen, P. Ole Fanger, "Air quality in a simulated office environment as a result of reducing pollution sources and increasing ventilation", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34, n. 8 (775-783), 2002.
3	49	Cristian Ghiaus, Francis Allard, "Potential for free-cooling by ventilation", <i>Solar Energy</i> , Vol. 80, n. 4, (402-413), 2006.
3	50	V. Leal, E. Maldonado, "The role of the PASLINK test cell in the modeling and integrated simulation of an innovative window", <i>Building and Environment</i> , 43, (217-227), 2008.
3	51	CEN, EN 779: 2002, Particulate air filters for general ventilation – Determination of the filtration performance.
3	52	Gabriel Bekö, "Used Filters and Indoor Air Quality", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 3, 2009.
3	53	Philomena M. Bluysen, et alii, "Why, when and how do HVAC-systems pollute the indoor environment and what to do about it? The European AIRLESS Project", <i>Building and Environment</i> , Vol. 38, n. 2, (209-225), 2003.
3	54	I.S. Buchanan and M.G. Apte, "Air Filter Materials and Building Related Symptoms in the BASE Study", <i>Lawrence Berkeley National Laboratory, Indoor Environment Department</i> , 2006.
3	55	Z. Lua, W. Z. Lub, J. L. Zhanga, D. X. Suna, "Microorganisms and Particles in AHU Systems: Measurement and Analysis", <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 1, (188-197), 2008.
3	56	R. Kosonen, F. Tan, "Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 10, (987-993), 2004.
3	57	William Fisk, Olli Seppanen, "Providing Better Indoor Environmental Quality Brings Economic Benefits", Key-note, Clima 2007 Wellbeing Indoors, Helsinquia, Finlândia, 2007.
3	58	Arto Saari, Topi Tissari, Esko Valkama, Olli Seppänen, "The effect of a redesigned floor plan, occupant density and the quality of indoor climate on the cost of space, productivity and sick leave in an office building – A case study", <i>Building and Environment</i> , Vol. 41, n. 12, (1961-1972), 2006.
3	59	Sami Karjalainen, Olavi Koistinen, "User problems with individual temperature control in offices", <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 8, (2880-2887), 2007.
3	60	R. Kosonen, F. Tan, "The effect of perceived indoor air quality on productivity loss", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 10, (981-986), 2004.
3	61	Pawel Wargocki, David P. Wyon, "Research Report on Effects of HVAC on Student Performance", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 48, n. 10, 2006.

Bibliografia

Capítulo	Ref	Autor
3	62	D.J. Clements-Croome, et alii, "Ventilation rates in schools", <i>Building and Environment</i> , Vol. 43, n. 3, (362-367), 2008.
3	63	Miguel Cavique, Paulo Madeira Costa, "Qualidade do Ar Interior, Energia e Produtividade", Climamed - Congresso Mediterrânico de Climatização, Lisboa, 2004.
3	64	Gabriel Beko, Geo Clausen, Charles J. Weschle, "Is the use of particle air filtration justified? Costs and benefits of filtration with regard to health effects, building cleaning and occupant productivity", <i>Building and Environment</i> , Vol. 43, n. 10 (1647–1657), 2008.
3	65	Fergus Nicol, Mike Wilson, Cecilia Chiancarella, "Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 38, n. 7, (802-813), 2006.
4	1	ASHRAE, <i>ASHRAE Handbook</i> , "HVAC Systems and Equipment, Chapter 12 - Hydronic Heating and Cooling", 2008.
4	2	Tina Yao, Anette Meyer Holley, <i>Central Plant Air Conditioning Portugal</i> , BSRIA Market Reports, 2001.
4	3	Young-Hum Cho, Mingsheng Liu, "Minimum airflow reset of single duct VAV terminal boxes", <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 9, (1876-1885), 2009.
4	4	Steven T. Taylor, "Increasing Efficiency With VAV System Static Pressure Setpoint Reset", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 47, n. 6, 2007.
4	5	N. Nassif, S. Moujaes, "A new operating strategy for economizer dampers of VAV system", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 3, (289–299), 2008.
4	6	Dennis Stanke, "Ventilation for Changeover-Bypass VAV Systems", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 46, n. 11, 2004.
4	7	Xinqiao Jin, Zhimin Du, "Fault tolerant control of outdoor air and AHU supply air temperature in VAV air conditioning systems using PCA method", <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 26, n. 11-12(1226–1237), 2006.
4	8	Xinqiao Jin, Haigang Ren, Xiaokun Xiao, "Prediction-based online optimal control of outdoor air of multi-zone VAV air conditioning systems", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 37, n. 9, (939–944), 2005.
4	9	Jin Wen, Theodore F. Smith, "Development and validation of online models with parameter estimation for a building zone with VAV system", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 1, (13–22), 2007.
4	10	Nabil Nassif, Samir Moujaes, Mohammed Zaheeruddin, "Self-tuning dynamic models of HVAC system components", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 9, (1709–1720), 2008.
4	11	Xinhua Xu, Shengwei Wang, Zhongwei Sun, Fu Xiao, "A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems", <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 29, n. 1, (91–104), 2009.
4	12	Jun Wang, Yan Wang, "Performance improvement of VAV air conditioning system through feedforward compensation decoupling and genetic algorithm", <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 28, n. 5-6, (566–574), 2008.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
4	13	J. Liang, R. Du, “Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies”, <i>Energy Conversion and Management</i> , Vol. 49, n. 4, (517–528), 2008.
4	14	Michael D. Larrañaga, Mario G. Beruvides, H.W. Holder, Enusha Karunasena, David C. Straus, “DOAS & Humidity Control”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 50, n. 5, 2008.
4	15	Thomas Lawrence, “Selecting CO ₂ Criteria for Outdoor Air Monitoring”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 50, n. 12, 2008.
4	16	Chi-Min Chu, Tai-Lang Jong, Yue-Wei Huang, “Thermal comfort control on multi-room fan coil unit system using LEE-based fuzzy logic”, <i>Energy Conversion and Management</i> , Vol. 46, n. 9-10, (1579–1593), 2005.
4	17	Ming-Tsun Ke, Kuo-Liang Weng, Che-Ming Chiang, “Performance evaluation of an innovative fan-coil unit: Low-temperature differential variable air volume FCU”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 6, (702–708), 2007.
4	18	ASHRAE, <i>ASHRAE Book</i> , “HVAC Systems and Equipment, Chapter 6 - Panel Heating and Cooling”, 2008.
4	19	Jae-Weon Jeong, Stan Mumma, “Designing a Dedicated Outdoor Air System with Ceiling Radiant Cooling Panels”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 48, n. 10, 2006.
4	20	J.P. Holman, <i>Heat Transfer</i> , McGraw-Hill Inc, 1997 (primeira edição de 1963).
4	21	Xiaoli Hao, et alli, “A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification”, <i>Building and Environment</i> , 42, (3298–3308), 2007.
4	22	Jan Fredriksson, Mats Sandberg, “The effect of false ceiling on the cooling capacity of passive chilled beams”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 7, (1426–1430), 2009.
4	23	David Butler, et alli, <i>Vigas arrefecidas</i> , Rehva, 2006 (versão original de 2004).
4	24	Barry M. Barnet, “Chilled beams for Labs”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 50, n.12, 2008.
4	25	Ye Yao, Zhiwei Lian, Weiwei Liu, Zhijian Hou, Ming Wu, “Evaluation program for the energy-saving of variable-air-volume systems”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 5, (558–568), 2007.
4	26	Tolga N. Aynur, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, “Simulation of a VAV air conditioning system in an existing building for the cooling mode”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 41, n. 9, (922-929), 2009.
4	27	Y.P. Zhou, J.Y. Wu, R.Z. Wang, S. Shiochi, “Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 2, (212–220), 2007.
4	28	Fredrik Engdahl, Dennis Johansson, “Optimal supply air temperature with respect to energy use in a variable air volume system”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 3, (205–218), 2004.

Bibliografia

Capítulo	Ref	Autor
4	29	S.C. Sekhar, "Space temperature difference, cooling coil and fan-energy and indoor air quality issues revisited", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 37, n. 1, (49–54), 2005.
4	30	Yiqun Pan, Hui Zhou, Zhizhong Huang, Yi Zeng, Weiding Long, "Measurement and simulation of indoor air quality and energy consumption in two Shanghai office buildings with variable air volume systems", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 35, n. 9, (877–891), 2003.
4	31	John Dieckmann, Kurt Roth, James Brodrick, "Dedicated Outdoor Air Systems Revisited", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 49, n. 12, 2007.
4	32	L.Z. Zhang, "Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures", <i>Energy</i> , Vol. 31, n. 8-9, (1228–1242), 2006.
4	33	Kurt Roth, John Dieckmann, Robert Zogg, James Brodrick, "Chilled Beam Cooling", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 49, n. 9, 2007.
4	34	Stanley A. Mumma, "30% Surplus AO. Does it use more energy?", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 6, 2009.
5	1	James Kunstler, <i>O Fim do Petróleo. O Grande Desafio do Século XXI</i> , Editorial Bizâncio, 2006.
5	2	Ministério da Economia e da Inovação, Grupo de Trabalho Indústria, "Portugal Eficiência 2015, Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética: Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa, Um Enquadramento Tecnológico Sucinto", 2008.
5	3	Leonard Brooks BA, "Energy Efficiencies Fallacies", UK Parliament, 2005.
5	4	Lorna A. Greening, David L. Greene, Carmen Difiglio, "Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 6-7 (389-401), 2000.
5	5	John Dimitropoulos, "Energy productivity improvements and the rebound effect: An overview of the state of knowledge", <i>Energy Policy</i> , Vol. 35, n. 12, (6354-6363), 2007.
5	6	Leonard Brookes, "Energy efficiency fallacies revisited", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 6-7, (355-366), 2000.
5	7	Horace Herring, Robin Roy, "Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect", <i>Technovation</i> , Vol. 27, n. 4, (194-203), 2007.
5	8	Steve Sorrell, John Dimitropoulos, "The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions", <i>Ecological Economics</i> , Vol. 65, n. 3, (636-649), 2008.
5	9	Fatih Birol, Jan Horst Keppler, "Prices, technology development and the rebound effect", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 6-7, (457-469), 2000.
5	10	Mark Hinnells, "Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings", <i>Energy Policy</i> , Vol. 36, n. 12, (4427-4433), 2008.
5	11	Harald Throne-Holst, Eivind Stø, Pal Strandbakken, "The role of consumption and consumers in zero emission strategies", <i>Journal of Cleaner Production</i> , Vol. 15, n. 13-14, (1328-1336), 2007.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
5	12	W.L.Lee, F.W.H. Yik, "Regulatory and voluntary approaches for enhancing building energy efficiency", <i>Progress in Energy and Combustion Science</i> , Vol. 30, n. 5, (477-499), 2004.
5	13	Leonard Brookes, "Energy efficiency fallacies—a postscript", <i>Energy Policy</i> , 32, (945–947), 2004.
5	14	ASHRAE, ASHRAE Standard 90.1: 2007, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
5	15	PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO, DIRECTIVA 2002/91/CE: 2002, 16 de Dezembro de 2002.
5	16	A. Zold-Zs. Szalay, "What is missing from the concept of the new European Building Directive?", <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 4, (1761-1769), 2007.
5	17	European Comission, Directorate-General for Energy and Transport, "Implementation of the European Performance of Buildings Directive, Country reports", Outubro 2006.
5	18	Ministre d'Etat, ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, et la ministre du logement et de la ville, "Arrêté relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments", 24 Maio 2006.
5	19	MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, REAL DECRETO 1027/2007, por el que se aprueba el reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 20 Julho 2007.
5	20	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energia, Ministério de Industria, turismo y Comercio, Comentários RITE-2007, Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, 2007.
5	21	PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA, Decreto Legislativo n. 192: "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia", <i>Gazzetta Ufficiale</i> n. 222 del 23 settembre 2005 - Supplemento Ordinario n. 158, 19 Agosto 2005.
5	22	F. Asdrubali, M. Bonaut, M. Battisti, M. Venegas, "Comparative study of energy regulations for buildings in Italy and Spain", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 10, (1805-1815), 2008.
5	23	Office of the Deputy Prime Ministre, L2A, "Conservation of fuel and power in new buildings other than dwellings", 2006.
5	24	Department of the Environment Heritage and Local Government, Technical Guidance, Document L, Conservation of Fuel and Energy, 2006.
5	25	Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei nº 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, 2006.
5	26	Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei nº 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, 2006.
5	27	CEN, EN 15251: 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

Bibliografia

Capítulo	Ref	Autor
5	28	Bjarne W. Olesen, "The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 7, (740-749), 2007.
5	29	Jessica Henryson, Teresa Hakansson, Jurek Pyrko, "Energy efficiency in buildings through information – Swedish perspective", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 3, (169-180), 2000.
5	30	Marilyn A. Brown, "Market failures and barriers as a basis for clean energy policies", <i>Energy Policy</i> , Vol. 29, n.14, (1197-1207), 2001.
5	31	Constantinos A. Balaras, et al, "European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings", <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 3, (1298-1314), 2007.
5	32	Paul A. Torcellini, "Understanding Zero-Energy Buildings", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 49, n. 9, 2006.
5	33	Duncan Phillips, Meiring Beyers, Joel Good, "Building Height and Net Zero. How High Can You Go?", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 9, 2009.
5	34	COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast) (first reading), Bruxelas, 18 November 2009.
5	35	Peter Schmid, Gabriella Pál.Schmid, "Renewal for Survival and the Eco-Paradox", XXXIV IASH World Congress Sustainable Housing Design, Nápoles, Itália, 2006.
5	36	Marta J.N. Oliveira Panão, Helder J.P. Gonçalves, Paulo M.C. Ferrão, "Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate", <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 1, (177-187), 2009.
5	37	Nuno Abrantes, Fernando Brandão Alves, Vítor Abrantes, "Rehabilitation of a Social Habitation Vila de Este", XXXIV IASH World Congress Sustainable Housing Design, Nápoles, Itália, 2006.
5	38	Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, "An Energy Efficiency Framework for the Design of HVAC Systems", The Fifth International Conference on Axiomatic Design, Campus de Caparica, Março 2009.
6	1	Miguel Cavique, Jorge Gil Saraiva, "Parametric Variation and Energy Consumption in Office Buildings", XXXII IAHS World Congress on Housing: Sustainability of the Housing Projects, Trento, Italy, 2004.
6	2	INMG e LNEC, "Temperaturas Exteriores de Projecto e Número de Graus-Dias", 1989.
6	3	INMG, <i>O Clima em Portugal</i> , fascículo XLIX, "Normais Climatológicas da Região de Ribatejo e Oeste, correspondentes a 1951-1980", 1991.
6	4	American Society for Quality Control, "How to Apply Response Surface Methodology", 1990.
6	5	ARI, Standard 550/590: 2003, Performance rating of water-chilling packages using vapor compression cycle.
6	6	Maurice Rizzo, <i>Chauffage et production d'e.c.s. au fuel</i> , Les Éditions Parisiennes, 1989.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
6	7	IPQ, NP EN 12237: 2008, Ventilação de edifícios, Sistemas de condutas, Resistência e estanquidade de condutas metálicas circulares.
6	8	F. Galvão de Mello, <i>Introdução aos Métodos Estatísticos</i> , Volume II, Livraria Escolar Editora, 1973.
7	1	Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, "Axiomatic Design and HVAC Systems", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 41, n. 2, (146-153), 2009.
7	2	Miguel Cavique, António M. Gonçalves Coelho, "Energy Efficiency or Functional Efficiency", XXXIV IAHS World Congress on Housing Sustainable Housing Design Emphasizing Urban Housing, Nápoles, Itália, 2006.
7	3	Miguel Cavique, António M. Gonçalves Coelho, "Air conditioning systems and geography: an introductory comparison", 37 ^o IAHS World Congress on Housing Science: Design, Technology, Refurbishment and Management of Buildings, Santander, Espanha, Outubro de 2010.
8	1	Miguel Cavique, António Freire Mourão, António M. Gonçalves-Coelho, "Reducing Complexity in Outdoor Air System", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, Itália, 2006.
9	1	Miguel Cavique, Modelo de Utilidade Nacional MU 10211: "Sistema de Climatização com ar novo dedicado", INPI, 2008.
Anexo	1	Nam P. Suh, <i>Complexity, Theory and Applications</i> , Pappalardo Series in Mechanical Engineering, Oxford University Press, 2005.
Apêndice 1	1	A.J.Osiadacz, <i>Simulation and Analysis of Gas Networks</i> , E&FN SPON, 1987.
Apêndice 1	2	Taesik Lee, Peter N. Jeziorek, "Understanding the value of eliminating an off-diagonal term in a design matrix", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
Apêndice 1	3	M. Coueignoux, "Approche théorique du calcul des grands réseaux maillés", Session multinationale ACTIM, Distribution du Gaz, 1984.
Apêndice 2	1	Timothy J. Ross, <i>Fuzzy Logic with Engineering Applications</i> , John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
Apêndice 2	2	J.Wesley Hines, <i>MATLAB Supplement to Fuzzy and Neural Approaches in Engineering</i> , John Wiley & Sons, Inc, 1997.

Tabela B2. Bibliografia ordenada por autor, capítulo e referência (ref)

Capítulo	Ref	Autor
2	25	A. Kerim KAR, "Linking Axiomatic Design and Taguchi Methods Via Information Content in Design", First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2000.
5	16	A. Zold-Zs. Szalay, "What is missing from the concept of the new European Building Directive?", <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 4, (1761-1769), 2007.
2	8	A.J.Osiadacz, <i>Simulation and Analysis of Gas Networks</i> , E&FN SPON, 1987.
Apêndice 1	1	Idem
2	10	A.M. Gonçalves-Coelho, A.J.F. Mourão, "Axiomatic Design: The Role of the Second Axiom", <i>Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Publicat de Universitatea Tehnica Gh. Asachi Iasi</i> , Tomul L (LIV), Fasc. V c, Sectia, Constructii de Masini, 2004.
2	5	A.M. Gonçalves-Coelho, António J.F. Mourão, "Axiomatic design as support for decision-making in a design for manufacturing context: A case study", <i>International Journal of Production Economics</i> , Vol. 109, n. 1-2, (81–89), 2007.
3	43	Abdeen Mustafa Omer, "Renewable building energy systems and passive human comfort solutions", <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , Vol. 12, n. 6, (1562-1587), 2008.
2	16	Alessandro Naddeo, "Axiomatic Framework Applied to Industrial Design Problem Formulated by para-Complete Logics Approach: The Power of Decoupling on Optimization Problem Solving", 4 th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
2	27	Allan L. Dickinson, "Integrating Axiomatic Design into a Design for Six Sigma Deployment", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
6	4	American Society for Quality Control, "How to Apply Response Surface Methodology", 1990.
2	3	AMM Sharif Ullah, "F-Granular Design Information Based Information Axiom", Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2002.
2	24	Andrea Del Taglia, Gianni Campatelli, "Axiomatic Design & QFD: A Case Study of a Reverse Engineering System for Cutting Tools", 4 th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
1	7	António Damásio, <i>O Erro de Descartes, Emoção, Razão e Cérebro Humano</i> , 21 ^a Edição, 1995.
2	29	António M. Gonçalves-Coelho, "Axiomatic Design and the Concurrent Engineering Paradigm", <i>Academic Journal of Manufacturing Engineering</i> , Vol 2, n. 2, 2004.
6	5	ARI, Standard 550/590: 2003, Performance rating of water-chilling packages using vapor compression cycle.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
3	58	Arto Saari, Topi Tissari, Esko Valkama, Olli Seppänen, "The effect of a redesigned floor plan, occupant density and the quality of indoor climate on the cost of space, productivity and sick leave in an office building – A case study", <i>Building and Environment</i> , Vol. 41, n. 12, (1961-1972), 2006.
3	27	ASHRAE, ASHRAE Standard 62.1: 2007, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
3	1	ASHRAE, <i>ASHRAE Handbook</i> , "Fundamentals, Chapter 8 - Thermal Comfort", 2005.
4	18	ASHRAE, <i>ASHRAE HandBook</i> , "HVAC Systems and Equipment, Chapter 6 - Panel Heating and Cooling", 2008.
4	1	ASHRAE, <i>ASHRAE Handbook</i> , "HVAC Systems and Equipment, Chapter 12 - Hydronic Heating and Cooling", 2008.
5	14	ASHRAE, ASHRAE Standard 90.1: 2007, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.
3	2	ASHRAE, Standard 55: 2007, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
1	8	Auguste Comte, <i>Cours de Philosophie Positive</i> , Classiques Garnier, edição sem data, (primeira edição 1826-1830).
3	16	B. Moujalled, R. Cantin and G. Guarracino, "Adaptive thermal comfort evaluation in a field study", International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece, 2005.
4	24	Barry M. Barnet, "Chilled beams for Labs", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 50, n.12, 2008.
2	14	Basem El-Haik, "An Integer Programming Formulation For The Concept Selection Problem With An Axiomatic Perspective (Part II): Fuzzy Formulation", First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2000.
5	28	Bjarne W. Olesen, "The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 7, (740-749), 2007.
3	9	C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus and E. Arens, "Air Quality and Thermal Comfort in Office Buildings: Results of a Large Indoor Environmental Quality Survey", Healthy Buildings, Lisboa, 2006.
3	46	CEN, CR 1752: 1998, Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment.
3	45	CEN, EN 13779: 2007, Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.
3	25	CEN, EN 15251: 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
5	27	Idem

Capítulo	Ref	Autor
3	51	CEN, EN 779: 2002, Particulate air filters for general ventilation – Determination of the filtration performance.
4	16	Chi-Min Chu, Tai-Lang Jong, Yue-Wei Huang, “Thermal comfort control on multi-room fan coil unit system using LEE-based fuzzy logic”, <i>Energy Conversion and Management</i> , Vol. 46, n. 9-10, (1579–1593), 2005.
2	6	Christopher A. Brown, “Kinds of Coupling and Approaches to Deal with them”, 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
3	42	Chuck Yu, Derrick Crumpt, “A Review of the Emission of VOCs from Polymeric Materials used in Buildings”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 33, n. 6, (357-374), 1998.
5	31	Constantinos A. Balaras, et al, “European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 3, (1298-1314), 2007.
5	34	COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast) (first reading), Bruxelas, 18 November 2009.
3	49	Cristian Ghiaus, Francis Allard, “Potential for free-cooling by ventilation”, <i>Solar Energy</i> , Vol. 80, n. 4, (402-413), 2006.
3	62	D.J. Clements-Croome, et alii, “Ventilation rates in schools”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 43, n. 3, (362-367), 2008.
3	36	Da Yan et alii, “An integrated modeling tool for simultaneous analysis of thermal performance and indoor air quality in buildings”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 43, n. 3 (287-293), 2008.
2	12	Daniel D. Frey, Ebad Jahangir, Fredrik Engelhardt, “Computing the Information Content of Decoupled Designs”, <i>Research in Engineering Design</i> , Vol. 12,n. 2, (90-102), 2000.
4	23	David Butler, et alli, <i>Vigas arrefecidas</i> , Rehva, 2006 (versão original de 2004).
2	26	Denis Cavallucci, Philippe Lutz, “Intuitive Design Method (IDM), a new Approach on Design Methods Integration”, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, 2000.
4	6	Dennis Stanke, “Ventilation for Changeover-Bypass VAV Systems”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 46, n. 11, 2004.
5	24	Department of the Environment Heritage and Local Government, Technical Guidance, Document L, Conservation of Fuel and Energy, 2006.
1	22	Don Clausing, <i>Total Quality Development</i> , ASME Press, 1994 (primeira edição em 1988).
5	33	Duncan Phillips, Meiring Beyers, Joel Good, “Building Height and Net Zero. How Hight Can You Go?”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 9, 2009.
3	20	Edward Arens, Stephen Turner, Hui Zhang, Gwelen Paliaga, “Moving Air for Comfort”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 5, 2009.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
5	17	European Comission, Directorate-General for Energy and Transport, "Implementation of the European Performance of Buildings Directive, Country reports", Outubro 2006.
1	18	European Commission, Value Management, Handbook, Report EUR 16096, DGXIII, 1995.
2	4	Idem
5	22	F. Asdrubali, M. Bonaut, M. Battisti, M. Venegas, "Comparative study of energy regulations for buildings in Italy and Spain", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 10, (1805-1815), 2008.
6	8	F. Galvão de Mello, <i>Introdução aos Métodos Estatísticos</i> , Volume II, Livraria Escolar Editora, 1973.
3	26	F. Nicol, L. Pagliano, "Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN 15251", 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 2007.
5	9	Fatih Birol, Jan Horst Keppler, "Prices, technology development and the rebound effect", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 6-7, (457-469), 2000.
3	41	Feng Lia, Jianlei Niua, Lizhi Zhang, "A physically-based model for prediction of VOCs emissions from paint applied to an absorptive substrate", <i>Building and Environment</i> , Vol. 41, n. 10, (1317-1325), 2006.
3	24	Fergus Nicol, Michael Humphreys, "Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort", <i>Solar Energy</i> , Vol. 81, n. 3, (295-304), 2007.
3	65	Fergus Nicol, Mike Wilson, Cecilia Chiancarella, "Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 38, n. 7, (802-813), 2006.
4	28	Fredrik Engdahl, Dennis Johansson, "Optimal supply air temperature with respect to energy use in a variable air volume system", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 3, (205-218), 2004.
1	19	G. Pahl e Beitz, <i>Engineering Design, a Systematic Approach</i> , second edition, Springer, 2001 (primeira edição em 1995).
3	52	Gabriel Bekö, "Used Filters and Indoor Air Quality", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 3, 2009.
3	64	Gabriel Beko, Geo Clausen, Charles J. Weschle, "Is the use of particle air filtration justified? Costs and benefits of filtration with regard to health effects, building cleaning and occupant productivity", <i>Building and Environment</i> , Vol. 43, n. 10 (1647-1657), 2008.

Capítulo	Ref	Autor
1	17	Genichi Taguchi, <i>Taguchi on Robust Technology Development, Bringing Quality Upstream</i> , ASME, 1995 (publicação original em 1990).
2	28	George E. Dieter, <i>Engineering Design, a Materials and Processing Approach</i> , McGraw-Hill International Editions, 2000.
2	21	Gwang-Seob Shin, Gyung-Jin Park, "Decoupling Process of a Coupled Design using the Triz Module", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florence, 2006.
2	13	Gwang-Sub Shin, Sang-Il Yi, Gyung-Jin Park, Jeong-Wook Yi, Yong-Deok Kwon, "Calculation of Information Content in Axiomatic Design", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
3	19	H.B. Rijal, P. Tuohy, F. Nicol, M.A. Humphreys, A. Samuel and J. Clarke, "Development of an adaptive window-opening algorithm to predict the thermal comfort, energy use and overheating in buildings", <i>Journal of Building Performance Simulation</i> , Vol. 1, n. 1, (17-30), 2008.
3	44	H.N. Knudsen, P. Wargocki, J. Vondruskova, "Effects of Ventilation on Perceived Quality of Air Polluted by Building Materials – a Summary of Reported Data", <i>Healthy Buildings</i> , Lisboa, 2006.
5	11	Harald Throne-Holst, Eivind Stø, Pal Strandbakken, "The role of consumption and consumers in zero emission strategies", <i>Journal of Cleaner Production</i> , Vol. 15, n. 13-14, (1328-1336), 2007.
2	11	Hilario L. Oh, "Amending Axiom II to Achieve a Six Sigma Design", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
5	7	Horace Herring, Robin Roy, "Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect", <i>Technovation</i> , Vol. 27, n. 4, (194-203), 2007.
3	54	I.S. Buchanan and M.G. Apte, "Air Filter Materials and Building Related Symptoms in the BASE Study", <i>Lawrence Berkeley National Laboratory, Indoor Environment Department</i> , 2006.
6	2	INMG e LNEC, "Temperaturas Exteriores de Projecto e Número de Graus-Dias", 1989.
6	3	INMG, <i>O Clima em Portugal</i> , fascículo XLIX, "Normais Climatológicas da Região de Ribatejo e Oeste, correspondentes a 1951-1980", 1991.
5	20	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energia, Ministério de Industria, turismo y Comercio, Comentários RITE-2007, Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, 2007.
6	7	IPQ, NP EN 12237: 2008, Ventilação de edifícios, Sistemas de condutas, Resistência e estanquidade de condutas metálicas circulares.
3	3	ISO 11079: 2007, Ergonomics of the thermal environment - Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
3	4	ISO 7243: 1989, Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature).
3	7	ISO 7730: 2005, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
3	5	ISO 7933: 2004, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
3	6	ISO 8996: 2004, Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate.
1	12	J. Eekels, "On the fundamentals of engineering design science: The geography of engineering design science. Part 1", <i>Journal of Engineering Design</i> , Vol 11, n. 4, (377-397), 2000.
1	14	J. Eekels, "On the fundamentals of engineering design science: The geography of engineering design science. Part 2", <i>Journal of Engineering Design</i> , Vol 12, n. 3, (255-281), 2001.
4	13	J. Liang, R. Du, "Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies", <i>Energy Conversion and Management</i> , Vol. 49, n. 4, (517-528), 2008.
3	12	J.F. Nicol, M.A. Humphreys, "Adaptative thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34, n. 6, (563-572), 2002.
4	20	J.P. Holman, <i>Heat Transfer</i> , McGraw-Hill Inc, 1997 (primeira edição de 1963).
Apêndice 2	2	J.Wesley Hines, <i>MATLAB Supplement to Fuzzy and Neural Approaches in Engineering</i> , John Wiley & Sons, Inc, 1997.
4	19	Jae-Weon Jeong, Stan Mumma, "Designing a Dedicated Outdoor Air System with Ceiling Radiant Cooling Panels", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 48, n. 10, 2006.
5	1	James Kunstler, <i>O Fim do Petróleo. O Grande Desafio do Século XXI</i> , Editorial Bizâncio, 2006.
3	37	James L. Repace, Kenneth C. Johnson, "Can Displacement Ventilation Control Secondhand ETS?", <i>ASHRAE IAQ Applications</i> , 2006.
4	22	Jan Fredriksson, Mats Sandberg, "The effect of false ceiling on the cooling capacity of passive chilled beams", <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 7, (1426-1430), 2009.
5	29	Jessica Henryson, Teresa Hakansson, Jurek Pyrko, "Energy efficiency in buildings through information – Swedish perspective", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 3, (169-180), 2000.
4	9	Jin Wen, Theodore F. Smith, "Development and validation of online models with parameter estimation for a building zone with VAV system", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 1, (13-22), 2007.

Capítulo	Ref	Autor
1	5	Jo Ritzen, "Universities and Innovation, Managing and Promoting Innovation", XX IASP World Conference on Science and Technology Parks, Lisbon, 2003.
4	31	John Dieckmann, Kurt Roth, James Brodrick, "Dedicated Outdoor Air Systems Revisited", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 49, n. 12, 2007.
5	5	John Dimitropoulos, "Energy productivity improvements and the rebound effect: An overview of the state of knowledge", <i>Energy Policy</i> , Vol. 35, n. 12, (6354-6363), 2007.
1	11	John P. van Gigch, "Comparing the Epistemologies of Scientific Disciplines in Two Distinct Domains: Modern Physics versus Social Sciences. I. The Epistemology and Knowledge Characteristics of the Physical Sciences", <i>Systems Research and Behavioural Science</i> , Vol. 19, n. 3, (199-209), 2002.
1	13	John P. van Gigch, "Comparing the Epistemologies of Scientific Disciplines in Two Distinct Domains: Modern Physics versus Social Sciences. II. The Epistemology and Knowledge Characteristics of the 'New' Social Sciences", <i>Systems Research and Behavioural Science</i> , Vol. 19, n. 6, (551-562), 2002.
3	17	Joost van Hoof, Jan L.M. Hensen, "Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones", <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 1, (156-170), 2007.
4	12	Jun Wang, Yan Wang, "Performance improvement of VAV air conditioning system through feedforward compensation decoupling and genetic algorithm", <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 28, n. 5-6, (566-574), 2008.
3	31	K.W. Mui, L.T. Wong, W.Y. Chan, "Energy impact assessment for the reduction of carbon dioxide and formaldehyde exposure risk in air-conditioned offices", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 8, (1412-1418), 2008.
1	6	Karl Popper, <i>A Lógica da Pesquisa Científica</i> , Editora Pensamento Cultrix, 17ª Edição, 1972 (primeira edição em 1959).
1	3	Karl R. Popper, <i>O Mito do Contexto</i> , Biblioteca de Filosofia Contemporânea, Edições 70, 1996 (com base em conferências de Popper de 1959, 1963 e 1965).
4	33	Kurt Roth, John Dieckmann, Robert Zogg, James Brodrick, "Chilled Beam Cooling", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 49, n. 9, 2007.
3	38	L. Alevantis, J. Wagner, W. Fisk, D. Sullivan, D. Faulkner, L. Gundel, J. Waldman, P. Flessel, "Design for smoking rooms", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 45, n. 7, 2003.
4	32	L.Z. Zhang, "Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures", <i>Energy</i> , Vol. 31, n. 8-9, (1228-1242), 2006.
5	6	Leonard Brookes, "Energy efficiency fallacies revisited", <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 6-7, (355-366), 2000.
5	13	Leonard Brookes, "Energy efficiency fallacies—a postscript", <i>Energy Policy</i> , 32, (945-947), 2004.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
5	3	Leonard Brooks BA, “Energy Efficiencies Fallacies”, UK Parliament, 2005.
5	4	Lorna A. Greening, David L. Greene, Carmen Difiglio, “Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey”, <i>Energy Policy</i> , Vol. 28, n. 6-7 (389-401), 2000.
Apêndice 1	3	M. Coueignoux, “Approche théorique du calcul des grands réseaux maillés”, Session multinationale ACTIM, Distribution du Gaz, 1984.
3	30	M. Griffiths , M. Eftekhari, “Control of CO2 in a naturally ventilated classroom”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 4, (556-560), 2007.
3	29	M. Santamouris et al., “Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 10(1833-1843), 2008.
2	23	M.D. Guenov, S.G. Barker, “Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the Decomposition of Engineering Systems”, <i>Systems Engineering</i> , Vol. 8, n.1, (29-40), 2004.
5	30	Marilyn A. Brown, “Market failures and barriers as a basis for clean energy policies”, <i>Energy Policy</i> , Vol. 29, n.14, (1197-1207), 2001.
5	10	Mark Hinnells, “Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings”, <i>Energy Policy</i> , Vol. 36, n. 12, (4427-4433), 2008.
5	36	Marta J.N. Oliveira Panão, Helder J.P. Gonçalves, Paulo M.C. Ferrão, “Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 1, (177-187), 2009.
6	6	Maurice Rizzo, <i>Chauffage et production d'e.c.s. au fuel</i> , Les Éditions Parisiennes, 1989.
3	13	Michael A. Humphreys, J. Fergus Nicol, “The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34,n. 6 (667-684), 2002.
3	23	Michael A. Humphreys, Mary Hancock, “Do people like to feel ‘neutral’? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 7, (867-874), 2007.
4	14	Michael D. Larrañaga, Mario G. Beruvides, H.W. Holder, Enusha Karunasena, David C. Straus, “DOAS & Humidity Control”, <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 50, n. 5, 2008.
1	9	Michael Ruse, <i>O Mistério de todos os Mistérios</i> , edições Quasi, 2002 (primeira edição em 1999).
1	10	Michel Foucault, <i>A Arqueologia do Saber</i> , Editora Almedina, 2005 (primeira edição Éditions Gallimard, 1969).
2	15	Michele Pappalardo, “Fusion of Belief in Axiomatic Design”, 4 th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.

Capítulo	Ref	Autor
3	10	Miguel Cavique, “Inquérito ao conforto térmico e comparação com os resultados da EN ISO 7730”, II Jornadas Técnicas da EFRIARC, Coimbra, 2002.
2	19	Miguel Cavique, António Freire Mourão, António M. Gonçalves-Coelho, “Reducing Complexity in Outdoor Air System”, 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, Itália, 2006.
8	1	Idem
5	38	Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, “An Energy Efficiency Framework for the Design of HVAC Systems”, The Fifth International Conference on Axiomatic Design, Campus de Caparica, Março 2009.
7	1	Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, “Axiomatic Design and HVAC Systems”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 41, n. 2, (146-153), 2009.
3	8	Miguel Cavique, António Gonçalves Coelho, “Comparação entre sistemas de ar condicionado”, Climamed, Madrid, 2005.
7	3	Miguel Cavique, António M. Gonçalves Coelho, “Air conditioning systems and geography: an introductory comparison”, 37º IAHS World Congress on Housing Science: Design, Technology, Refurbishment and Management of Buildings, Santander, Espanha, Outubro de 2010.
7	2	Miguel Cavique, António M. Gonçalves Coelho, “Energy Efficiency or Functional Efficiency”, XXXIV IAHS World Congress on Housing Sustainable Housing Design Emphasizing Urban Housing, Nápoles, Itália, 2006.
6	1	Miguel Cavique, Jorge Gil Saraiva, “Parametric Variation and Energy Consumption in Office Buildings”, XXXII IAHS World Congress on Housing: Sustainability of the Housing Projects, Trento, Italy, 2004.
9	1	Miguel Cavique, Modelo de Utilidade Nacional MU 10211: “Sistema de Climatização com ar novo dedicado”, INPI, 2008.
1	21	Miguel Cavique, Paulo Madeira Costa, “Contributo para a Aplicação da “Análise do Valor” a Instalações de Climatização”, CIAR 99, Lisboa, 1999.
3	63	Miguel Cavique, Paulo Madeira Costa, “Qualidade do Ar Interior, Energia e Produtividade”, Climamed - Congresso Mediterrânico de Climatização, Lisboa, 2004.
4	17	Ming-Tsun Ke, Kuo-Liang Weng, Che-Ming Chiang, “Performance evaluation of an innovative fan-coil unit: Low-temperature differential variable air volume FCU”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 6, (702–708), 2007.
5	2	Ministério da Economia e da Inovação, Grupo de Trabalho Indústria, “Portugal Eficiência 2015, Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética: Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa, Um Enquadramento Tecnológico Sucinto”, 2008.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
3	28	Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei nº 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, 2006.
5	26	Idem
5	25	Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei nº 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, 2006.
5	19	MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, REAL DECRETO 1027/2007, por el que se aprueba el reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 20 Julho 2007.
5	18	Ministre d'Etat, ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, et la ministre du logement et de la ville, "Arrêté relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments", 24 Maio 2006.
4	5	N. Nassif, S. Moujaes, "A new operating strategy for economizer dampers of VAV system", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 3, (289–299), 2008.
4	10	Nabil Nassif, Samir Moujaes, Mohammed Zaheeruddin, "Self-tuning dynamic models of HVAC system components", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 9, (1709–1720), 2008.
3	34	Nakorn Tippayawong, et alii, "Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments", <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 11, (188-197), 2009.
2	20	Nam P. Suh, "Complexity in Engineering", Dn Keynote Paper, <i>The Park Centre for Complex Systems</i> , MIT, 2005.
2	2	Nam P. Suh, <i>Axiomatic Design: Advances and Applications</i> , Oxford University Press, 2001.
2	9	Nam P. Suh, <i>Complexity, Theory and Applications</i> , Pappalardo Series in Mechanical Engineering, Oxford University Press, 2005.
Anexo	1	Idem
1	20	Nam P. Suh, <i>The Principles of Design</i> , Oxford University Press, 1990.
2	1	Idem
3	35	NE Klepeis, WW Nazaroff, "Characterizing size-specific ETS particle emissions", Indoor Air, Monterey, CA, USA, 2002.
2	17	Nicola Cappetti, Alessandro Naddeo, Arcangelo Pellegrino, "Design Decoupling Method Based on Para-Complete Logics", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
3	32	Nicolas L. Gilbert, et alii, "Air change rate and concentration of formaldehyde in residential indoor air", <i>Atmospheric Environment</i> , Vol. 42, n. 10, (2424-2428), 2008.

Capítulo	Ref	Autor
5	37	Nuno Abrantes, Fernando Brandão Alves, Vítor Abrantes, "Rehabilitation of a Social Habitation Vila de Este", XXXIV IASH World Congress Sustainable Housing Design, Nápoles, Itália, 2006.
5	23	Office of the Deputy Prime Ministre, L2A, "Conservation of fuel and power in new buildings other than dwellings", 2006.
3	14	Ole Fanger, Jorn Toftum, "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34, n. 6, (533-536), 2002.
3	39	Olivier Lazcka, F. Javier Del Campo, F. Xavier Muñoz, "Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors", <i>Biosensors and Bioelectronics</i> , Vol. 22, n. 7, (1205-121), 2007.
2	18	Osman Kulak, Sule Itir Satoglu, M. Bulent Durmusoglu, "Multi-attribute Material Handling Equipment Selection Using Information Axiom", The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
3	47	P. Wargocki, P.O. Fanger, P. Krupicz, A. Szczecinski, "Sensory pollution loads in six office buildings and a department store", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 10, (995-1001), 2004.
5	15	PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO, DIRECTIVA 2002/91/CE: 2002, 16 de Dezembro de 2002.
5	32	Paul A. Torcellini, "Understanding Zero-Energy Buildings", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 49, n. 9, 2006.
3	61	Pawel Wargocki, David P. Wyon, "Research Report on Effects of HVAC on Student Performance", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 48, n. 10, 2006.
3	48	Pawel Wargocki, Zsolt Bako-Biro, Geo Clausen, P. Ole Fanger, "Air quality in a simulated office environment as a result of reducing pollution sources and increasing ventilation", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 34, n. 8 (775-783), 2002.
5	35	Peter Schmid, Gabriella Pál.Schmid, "Renewal for Survival and the Eco-Paradox", XXXIV IASH World Congress Sustainable Housing Design, Nápoles, Itália, 2006.
3	53	Philomena M. Bluysen, et alii, "Why, when and how do HVAC-systems pollute the indoor environment and what to do about it? The European AIRLESS Project", <i>Building and Environment</i> , Vol. 38, n. 2, (209-225), 2003.
5	21	PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA, Decreto Legislativo n. 192: "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia", <i>Gazzetta Ufficiale</i> n. 222 del 23 settembre 2005 - Supplemento Ordinario n. 158, 19 Agosto 2005.
3	15	R. Brandão et al., "The new research centre of the Brazilian Petroleum Company in Rio de Janeiro, Brazil: The achievements in the thermal performance of air-conditioned buildings in the tropics", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 10, (1917-1930), 2008.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
3	56	R. Kosonen, F. Tan, "Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 10, (987-993), 2004.
3	60	R. Kosonen, F. Tan, "The effect of perceived indoor air quality on productivity loss", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 36, n. 10, (981-986), 2004.
3	11	Richard J. de Dear, Gail Schiller Brager, "Developing an Adaptative Model of Thermal Comfort and Preference", <i>ASHRAE transactions</i> , 1998.
3	22	Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes, "Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 7, (1353-1365), 2008.
4	29	S.C. Sekhar, "Space temperature difference, cooling coil and fan-energy and indoor air quality issues revisited", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 37, n. 1, (49-54), 2005.
3	59	Sami Karjalainen, Olavi Koistinen, "User problems with individual temperature control in offices", <i>Building and Environment</i> , Vol. 42, n. 8, (2880-2887), 2007.
1	15	Semyon D. Savransky, <i>Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving</i> , CRC Press, 2000.
4	34	Stanley A. Mumma, "30% Surplus AO. Does it use more energy?", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 51, n. 6, 2009.
3	18	Stefano Schiavon, Arsen K. Melikov, "Energy saving and improved comfort by increased air movement", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n.10, (1954-1960), 2008.
5	8	Steve Sorrell, John Dimitropoulos, "The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions", <i>Ecological Economics</i> , Vol. 65, n. 3, (636-649), 2008.
4	4	Steven T. Taylor, "Increasing Efficiency With VAV System Static Pressure Setpoint Reset", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 47, n. 6, 2007.
1	16	Stuart Pugh, <i>Total Design, Integrated Methods for Successful Product Engineering</i> , Pearson Education Limited, 1990.
2	7	Taesik Lee, Peter N. Jeziorek, "Understanding the value of eliminating an off-diagonal term in a design matrix", 4th International Conference on Axiomatic Design, Florença, 2006.
Apêndice 1	2	Idem
1	1	Terence Love, "Constructing a coherent cross-disciplinary body of theory about designing and design: some philosophical issues", <i>Design Studies</i> , Vol. 23, n. 3, (345-361), 2002.
1	2	Thomas Kuhn, <i>A Estrutura das Revoluções Científicas</i> , Debates Ciência, Perspectiva, 8ª Edição, 1970 (primeira edição em 1962).
4	15	Thomas Lawrence, "Selecting CO ₂ Criteria for Outdoor Air Monitoring", <i>ASHRAE Journal</i> , Vol. 50, n. 12, 2008.

Capítulo	Ref	Autor
Apêndice 2	1	Timothy J. Ross, <i>Fuzzy Logic with Engineering Applications</i> , John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
4	2	Tina Yao, Anette Meyer Holley, <i>Central Plant Air Conditioning Portugal</i> , BSRIA Market Reports, 2001.
4	26	Tolga N. Aynur, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, "Simulation of a VAV air conditioning system in an existing building for the cooling mode", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 41, n. 9, (922-929), 2009.
3	33	Tom Marsika, Ron Johnson, "HVAC air-quality model and its use to test a PM 2.5 control strategy", <i>Building and Environment</i> , 43, (1850-1857), 2008.
3	50	V. Leal, E. Maldonado, "The role of the PASLINK test cell in the modeling and integrated simulation of an innovative window", <i>Building and Environment</i> , 43, (217-227), 2008.
3	40	Verein Deutscher Ingenieure, VDI 6022: 2006, Hygiene requirements for ventilation and air-conditioning systems and units.
1	4	Vladimir Hubka, W. Ernst Eder, <i>Design Science</i> , Springer-Verlag London Limited, 1996 (versão original de 1992).
5	12	W.L.Lee, F.W.H. Yik, "Regulatory and voluntary approaches for enhancing building energy efficiency", <i>Progress in Energy and Combustion Science</i> , Vol. 30, n. 5, (477-499), 2004.
3	57	William Fisk, Olli Seppanen, "Providing Better Indoor Environmental Quality Brings Economic Benefits", Key-note, Clima 2007 Wellbeing Indoors, Helsinquia, Finlândia, 2007.
4	21	Xiaoli Hao, et alli, "A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification", <i>Building and Environment</i> , 42, (3298-3308), 2007.
4	11	Xinhua Xu, Shengwei Wang, Zhongwei Sun, Fu Xiao, "A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems", <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 29, n. 1, (91-104), 2009.
4	8	Xinqiao Jin, Haigang Ren, Xiaokun Xiao, "Prediction-based online optimal control of outdoor air of multi-zone VAV air conditioning systems", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 37, n. 9, (939-944), 2005.
4	7	Xinqiao Jin, Zhimin Du, "Fault tolerant control of outdoor air and AHU supply air temperature in VAV air conditioning systems using PCA method", <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol. 26, n. 11-12(1226-1237), 2006.
4	27	Y.P. Zhou, J.Y. Wu, R.Z. Wang, S. Shiochi, "Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 2, (212-220), 2007.
4	25	Ye Yao, Zhiwei Lian, Weiwei Liu, Zhijian Hou, Ming Wu, "Evaluation program for the energy-saving of variable-air-volume systems", <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 39, n. 5, (558-568), 2007.

Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização

Capítulo	Ref	Autor
4	30	Yiqun Pan, Hui Zhou, Zhizhong Huang, Yi Zeng, Weiding Long, “Measurement and simulation of indoor air quality and energy consumption in two Shanghai office buildings with variable air volume systems”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 35, n. 9, (877–891), 2003.
3	21	Yongmin Yan, Jin Zhou, Yaolin Lin, Wei Yang, Ping Wang, Guoqiang Zhang, “Adaptive optimal control model for building cooling and heating sources”, <i>Energy and Buildings</i> , Vol. 40, n. 8, (1394-1401), 2008.
2	22	Young Ju Kang, “The Method for Uncoupling Design by Contradiction Matrix of Triz, and Case Study”, The Third International Conference on Axiomatic Design, Seoul, 2004.
4	3	Young-Hum Cho, Mingsheng Liu, “Minimum airflow reset of single duct VAV terminal boxes”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 9, (1876-1885), 2009.
3	55	Z. Lua, W. Z. Lub, J. L. Zhanga, D. X. Suna, “Microorganisms and Particles in AHU Systems: Measurement and Analysis”, <i>Building and Environment</i> , Vol. 44, n. 1, (188-197), 2008.

